

## **Dissertação**

# *Análise Estatística do Comportamento de Solos Finos.*

**Cristina Oliveira Roriz**

**Orientador: Prof. José Camapum de Carvalho**

**Co-orientador: Prof. André Pacheco de Assis**

**Brasília, 21 de dezembro de 2009.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DO COMPORTAMENTO DE  
SOLOS FINOS**

**CRISTINA OLIVEIRA RORIZ**

**ORIENTADOR: JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD**  
**CO-ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO: G.DM-183/09**

**BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO DE 2009**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA DO COMPORTAMENTO DE  
SOLOS FINOS.**

**CRISTINA OLIVEIRA RORIZ**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

**APROVADA POR:**

---

**JOSÉ CAMAPUM DE CARVALHO, PhD (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**MÁRCIO MUNIZ DE FARIAS, PhD (UnB)  
EXAMINADOR INTERNO**

---

**FABRÍCIO BUENO DA FONSECA CARDOSO, Doutor  
EXAMINADOR EXTERNO**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 21 DE DEZEMBRO DE 2009.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

RORIZ, CRISTINA OLIVEIRA

Análise Estatística das propriedades dos solos finos.

xiv, 112 p., 210 mm x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2009).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Análise Estatística

2. Correlações

3. Solos Finos

4. Regressão Multiparamétrica

I. ENC/ FT/ UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RORIZ, C. O. (2009). Análise estatística das propriedades dos solos finos. Dissertação de Mestrado, G.DM-183/09. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Cristina Oliveira Roriz

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise estatística das propriedades dos solos finos.

GRAU / ANO: Mestre/2009.

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Cristina Oliveira Roriz

SQN 703 Bl.E ap. 306, Asa Norte

70730-705 – Brasília-DF - Brasil

e-mail: croriz@gmail.com

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a UnB e ao departamento de Geotecnia pela oportunidade de ter cursado as disciplinas tanto da graduação quanto do mestrado.

Agradeço ao professor José Camapum, pela orientação dedicada. Por ter se dividido entre os papéis de guia e motivador para a realização dos estudos necessários e amigo, sendo compreensivo nos momentos em que, por questões pessoais e profissionais, eu não pude ter a dedicação esperada.

Agradeço ao professor André Assis que mesmo depois dos anos de PET, continua sendo para mim um tutor me apoiando e orientando nos momentos difíceis. Em grande parte das conquistas e momentos felizes que guardo dos anos de graduação o senhor esteve presente (a seleção do PET, a viagem técnica a barragens, as semanas de engenharia civil) e fico feliz por agora, na conclusão do mestrado, poder contar mais uma vez com seu apoio.

Agradeço também aos outros professores do departamento – prof. Márcio Muniz, Ennio Palmeira, Pedro Murrieta, Renato Pinto, Newton de Souza e Luis Fernando Ribeiro.

Um agradecimento especial aos colegas de curso. Em especial, agradeço aos amigos Márcia Mascarenhas, Luciana e Susana Dellabianca, Luis Guilherme Mello, Sandra, Joice Milonas, Manoel Porfírio, Janaina Colmaneti e muitos outros que fizeram da geotecnia muito mais que um grupo de trabalho e estudo. Guardarei sempre comigo as lembranças das partidas de futebol, festas juninas e tantos outros momentos. Festinha simples, mas tão agradáveis e divertidas que acabam sendo inesquecíveis.

Agradeço também a minha família. Minha mãe, minha irmã, avós, tios e primos pelo apoio incondicional e por torcerem sempre pelo meu sucesso. Ao meu marido por me tornar uma pessoa mais completa. Sua presença ao meu lado me dá força para encarar desafios cada vez maiores e dividir as alegrias com você faz cada conquista muito mais feliz.

Conquistas como essa são resultado de tantos esforços, do apoio de muitas pessoas e acasos. Agradeço a Deus por ter me dado todas as oportunidades e colocado na minha vida tantas pessoas que me apoiaram e sem as quais eu não teria chegado até aqui.

## RESUMO

Esse trabalho visa, a partir dos dados sobre os solos tropicais do Distrito Federal encontrados na literatura, avaliar a existência ou não de relação entre os diversos parâmetros físicos, químicos, mineralógicos e o comportamento mecânico dos solos. A metodologia adotada inclui análises dos coeficientes de correlação e a utilização de técnicas de regressão multiparamétrica para a elaboração de equações preliminares visando possibilitar a estimativa de parâmetros geotécnicos a partir do conhecimento do valor de outras variáveis. Como resultado encontrou-se que as propriedades químico-mineralógicas estão altamente correlacionadas, o que em alguns casos indica uma relação direta entre os parâmetros, mas muitas vezes são falsos correlatos, sendo os altos coeficientes de correlação resultado da relação entre os parâmetros analisados e o grau de intemperismo. A análise das equações multiparamétricas para estimativa de parâmetros geotécnicos levou às seguintes conclusões: (i) Para os solos arenosos, mesmo com a utilização apenas de parâmetros físicos como variáveis dependentes, as equações apresentaram excelentes níveis de ajuste. Esse resultado está de acordo com a literatura, que confirma a predominância da influência dos índices físicos, notadamente a granulometria, na determinação das propriedades geotécnicas dos solos arenosos, nos quais as partículas seriam praticamente inertes e com baixa interação química; (ii) para os solos siltosos a maioria das equações apresentou níveis de ajustes significativamente melhores com a consideração de índices químicos além dos físicos confirmando que para esses solos as propriedades químicas são importantes para a determinação do comportamento geomecânico. Dado o alto nível de correlação entre os parâmetros, ressalta-se a importância de se considerar índices para a avaliação de multicolinearidade entre outras falhas que podem levar a equações que não representam adequadamente o comportamento e as relações entre os parâmetros.

## ABSTRACT

This research aims to examine the existence or not of a relationship between chemical, physical and mineralogical parameters and the mechanical behavior of tropical soils based on available data for the Federal District, Brazil. The methodology applied consists in the analysis of the correlation coefficients and the use of multiparametric regression techniques for the development of preliminary equations to estimate geotechnical parameters based on soil primary data. As a result, it was found that the chemical-mineralogical properties are significantly correlated, which can indicate a direct relation between the variables but can also represent false correlates when the high correlation coefficients result not from the relation between the parameters but from the relationship between the parameter considered and the soil weathering process. The analysis of the equation developed led to the following conclusions: (i) for sand soils, even when considering only physical parameters as dependent variables, the equation presented excellent adjustment levels - this result is in line with other authors' findings which confirm the predominance of the influence of physical indices, mainly grain size distribution, on the geotechnical proprieties of sandy soils; (ii) for silty soils most of the equations have presented significantly better adjustment levels when, in addition to the physical parameters, chemical indices were considered, confirming that for these soils the chemical properties are important for the determination of mechanical behavior. Considering the high correlation level between the parameters, this research stresses the importance of, when using regression techniques, to undertake a careful evaluation of multicollinearity and other estimation biases that can lead to equations that do not adequately represent soil behavior and the relationship between the parameters.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos .....	1
1.2 Estrutura da dissertação.....	2
<b>2. EMBASAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
2.1 Solos Tropicais .....	3
2.2 Perfis de Intemperismo .....	5
2.3 Gênese e Caracterização de solos: aspectos químicos, mineralógicos e físicos.....	7
2.3.1 Aspectos físicos .....	8
2.3.2 Aspectos mineralógicos .....	9
2.3.3 Aspectos químicos .....	11
2.4 Ensaio para classificação dos solos Tropicais – Metodologia MCT .....	14
2.5 Comportamento Geotécnico dos solos tropicais.....	17
2.5.1 Resumos das propriedades dos solos tropicais .....	19
2.6 Análises Estatísticas .....	27
2.6.1 Estatística Descritiva .....	28
2.6.2 Distribuição Normal .....	29
2.6.3 Análise de Variância .....	31
2.6.4 Correlação .....	32
2.6.5 Regressão .....	35
2.6.5.1. Seleção das variáveis.....	36
2.6.5.2 Regressão Linear Múltipla .....	37
2.6.5.3 Estimativa dos Parâmetros: Método dos Mínimos Quadrados. ....	38
2.6.5.4 Testes Estatísticos: Estatística-t.....	39
2.6.5.5 Testes Estatísticos: Significância .....	40
2.6.5.6 Testes Estatísticos: Teste “d”de Durbin-Watson.....	41
<b>3. Materiais e Métodos .....</b>	<b>42</b>
3.1 Solos a serem analisados no estudo.....	43
3.2 Análises Estatísticas .....	44
<b>4. Caracterização dos Solos Estudados .....</b>	<b>46</b>
4.1 Propriedades físicas .....	46
4.2 Propriedades Químicas e Mineralógicas.....	49
4.2.1 Potencial Hidrogeniônico (pH) .....	49
4.2.2 Determinação do Teor de Matéria Orgânica (MO) .....	51
4.2.3 Capacidade de Troca Catiônica (CTC).....	51
4.2.4 Extração Química Total .....	52
4.2.5 Extração química das fases minerais .....	52
4.2.6 Composição mineralógica .....	54
4.3 Propriedades Geotécnicas .....	56



4.3.1	Curvas de Compactação.....	57
4.3.2	Perda de Massa por Imersão .....	61
4.3.3	Curvas Características .....	62
4.3.3.1	Resultados dos ensaios realizados por Delgado (2007). .....	64
4.3.4	Ensaio de Cisalhamento Direto de Solos.....	66
<b>6.</b>	<b>Análises Estatísticas .....</b>	<b>71</b>
6.1	Seleção das variáveis.....	72
6.1.1	Classificação dos solos .....	72
6.2	Análises Estatísticas – Propriedades químicas .....	75
6.2.1	Parâmetros químico-mineralógicos e classificação dos solos.....	78
6.2.1.1	Caracterização química dos solos argilosos .....	78
6.2.1.2	Caracterização Química dos Solos Siltosos .....	80
6.2.1.3	Caracterização Química dos Solos Arenosos.....	80
6.2.1.4	Coefficientes de correlação entre os parâmetros selecionados .....	81
6.3	Análises Estatísticas – Propriedades Físicas .....	84
6.3.1	Caracterização física dos diferentes tipos de solos.....	84
6.3.1.1	Análises da granulometria.....	85
6.3.1.2	Correlações entre os parâmetros físicos.....	88
6.3.2	Correlações entre os parâmetros químico-mineralógicos e físicos. ....	89
6.3.2.1	Composição químico-mineralógica e formação de agregados .....	92
6.3.2.3	Limites de Atterberg.....	93
6.4	Análises Estatísticas – Propriedades Geomecânicas.....	94
6.4.1	Análise de Variância – ANOVA .....	96
6.4.2	Ensaio de Compactação .....	96
6.4.3	Resistência ao Cisalhamento .....	97
6.4.4	Curvas Características .....	98
6.4.5	Correlações .....	98
6.4.6	Equações para inferência de parâmetros geotécnicos .....	100
6.4.7	Teste das Equações para dados da literatura .....	102
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS.....</b>	<b>105</b>
7.1	Sugestões para pesquisas futuras .....	107
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>109</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Distribuição dos solos lateríticos sobre a superfície da Terra.....	4
Figura 2.2: Distribuição dos solos lateríticos no Brasil.....	5
Figura 2.3: Evolução Químico-Mineralógica dos Solos Tropicais Colapsíveis.....	10
Figura 2.4: Principais componentes minerais dos solos.....	11
Figura 2.5: Mobilização do Fe, Al e Si em função do pH.....	12
Figura 2.6: Diagrama de ensaios MCT.....	16
Figura 2.7: Distribuição Normal.....	30
Figura 2.8: Comparação entre as Distribuições Normal e a de Student .....	31
Figura 2.9: Exemplos de diagrama de dispersão .....	33
Figura 3.1: Mapa geológico do Distrito Federal e pontos selecionados para coleta .....	44
Figura 3.2: Parâmetros Químicos/Mineralógicos, Físicos e Geotécnicos .....	45
Figura 4.1: Estrutura dos solos compactados (Massad, 2003) .....	59
Figura 4.2: Parâmetros de Mini-Compactação (Delgado, 2007).....	61
Figura 4.3: Detalhe da caixa de cisalhamento .....	67
Figura 4.3: Resultado de um ensaio de cisalhamento direto .....	68
Figura 6.1: Exemplo de resultado da ANOVA com o uso do Excel.....	78
Figura 6.2: Parâmetros Químicos - Média, mediana e desvio-padrão solos argilosos .....	79
Figura 6.3: Parâmetros Químicos - Média, mediana e desvio-padrão solos siltosos .....	80
Figura 6.4: Parâmetros Químicos - Média, mediana e desvio-padrão solos arenosos .....	81
Figura 6.5: Parâmetros Físicos - Média, mediana e desvio-padrão.....	85
Figura 6.6: Comparação entre as os percentuais granulométricos com e sem o uso de defloculante para as treze amostras avaliadas. ....	86
Figura 6.7: Análise Granulométrica dos solos.....	87
Figura 6.8: Valores médios de $W_{ot}$ , $\gamma_{dmax}$ e PMI para cada tipo de solo.....	97
Figura 6.9: Valores médios de $W_{ot}$ , $\gamma_{dmax}$ e PMI para cada tipo de solo.....	97

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1: Síntese das Classificações de perfis lateríticos completos. ....	6
Tabela 2.2: Exemplos de reações de hidrólise de minerais .....	11
Tabela 2.3: Características geoquímicas e cristal químicas da alteração hidrolítica.....	13
Tabela 4.1: Caracterização Física dos Solos Estudados .....	47
Tabela 4.2: Análise Granulométrica das Amostras de Solos em Estado Natural.....	48
Tabela 4.3: Resultados de pH obtidos para os solos estudados.....	50
Tabela 4.4: Propriedades Químicas dos Solos Estudados .....	52
Tabela 4.5: Análise Química Total e Cálculo da Relação Sílica-Sesquióxidos .....	53
Tabela 4.6: Características Mineralógica dos Solos Estudados .....	54
Tabela 4.7: Teor de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> nas Amostras Estudadas .....	56
Tabela 4.8: Resultados obtidos para os ensaios de compactação. ....	62
Tabela 4.9: Curvas Características para Amostras Indeformadas .....	66
Tabela 4.10: Resultados do ensaio de cisalhamento. ....	70
Tabela 6.1: Classificações dos solos: MCT, SUCS, TRB e Cardoso (2002). ....	73
Tabela 6.2: Análise de Variância: classificações MCT, SUCS e Cardoso (2002). ....	74
Tabela 6.3: Propriedades Químicas e Mineralógicas para cada tipo de solo .....	75
Tabela 6.4: propriedade química obtidas por Cardoso (2002) e Delgado (2007). ....	77
Tabela 6.5: Coeficientes de correlação entre os parâmetros químicos .....	83
Tabela 6.6: Valores do Índice de Flocculação para as amostras analisadas.....	88
Tabela 6.7: Coeficientes de Correlação para os parâmetros físicos. ....	88
Tabela 6.8: Correlação entre os parâmetros químico-mineralógicos e granulometria.....	91
Tabela 6.9: Coeficiente de Correlação: Índice de Flocculação e Mineralogia.....	92
Tabela 6.10: Coeficiente de Correlação: Limites de Atterberg .....	94
Tabela 6.11: Resumo dos parâmetros geomecânicos considerados .....	95
Tabela 6.12: Coeficientes de Correlação para os parâmetros geotécnicos.....	99
Tabela 6.13: Equações para estimação de parâmetros geotécnicos.....	101
Tabela 6.14: Dados para o solo de Anápolis-GO ( Guimarães, 2006) .....	102
Tabela 6.15: Dados para o Campo Experimental da UnB ( Delgado, 2002) .....	103
Tabela 6.16: Dados para os solos do Distrito Federal (Rezende, 2003).....	104

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMECLATURA E ABREVIações

°C	Graus Celsius
AASHTO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumina
ANOVA	Análise de variância
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B <sub>0</sub>	Pressão correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos
c	Coesão
Cu	Coeficiente de uniformidade
c'	Coeficiente de Deformabilidade da classificação MCT
Ca	Cálcio
Cc	Coeficiente de curvatura
Cl	Cloro
cmol <sub>c</sub> /kg	Centimol por quilograma
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
D <sub>50</sub>	Diâmetro tal que 50% das partículas de solo sejam inferiores a ele
DF	Distrito Federal
DNER-ME	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
e	Índice de vazios
e'	Índice de Classificação MCT
e <sub>0</sub>	Índice de vazios inicial
EAMA	Pressão de entrada de ar nos macroporos
EAMI	Pressão de entrada de ar nos microporos
F	Distribuição de Fisher
G	Densidade dos grãos
gl	Graus de liberdade
H	Hidrogênio
HB	Horizonte B - Latossolos
HBR	Solos do Horizonte B estudados por Rezende (2003).
HRB	<i>Highway Research Board</i>
I <sub>A</sub>	Índice de Atividade de Skempton
I <sub>C</sub>	Índice de Consistência
IF	Índice de floculação calculado por: ( % com uso de defloculante - % sem o uso de defloculante) / % com uso de defloculante
IF2	Índice de floculação calculado por: % com uso de defloculante / % sem o uso de defloculante

Índice Ki	Corresponde a relação entre a concentração de sílica e Óxidos de Alumínio ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ )
Índice Kr	Corresponde a relação entre a concentração de sílica e Óxidos de Alumínio e Ferro ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ( $(\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3))$ )
IP	Índice de plasticidade
K	Potássio
k	Permeabilidade
$\text{K}^+$	Potássio
$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3)\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Illita
$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	Feldspato
kPa	Quilopascal
LA	Classificação MCT: areias com pouca argila laterítica
LA'	Classificação MCT: areias argilosas lateríticas
LG'	Classificação MCT: argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas;
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MgO	Óxido de Magnésio
Mini CBR	Ensaio de suporte da metodologia MCT
Mini MCV	Ensaio da metodologia MCT
mm	milímetros
MO	Teor de Matéria Orgânica
n	Porosidade
N G'	Classificação MCT: argilas siltosas e argilas arenosas não-lateríticas
NA	Classificação MCT: areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não lateríticos.
NA'	Classificação MCT: areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas
NS'	Classificação MCT: siltes caulíníticos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos
PF	perda ao fogo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PMI	Perda de massa por imersão
r	Coeficiente de correlação linear de Pearson
$R^2$	Coeficiente de correlação múltipla ou coeficiente de determinação
SF	Saprolito Fino
$\text{SiO}_2$	Sílica
Sr	Grau de saturação
Sr Bo	Saturação correspondente ao ponto Bo
Sr EAMI	Saturação correspondente ao ponto EAMI
SUCS	<i>Unified Soil Classification System</i>

$tg\beta$	Inclinação curva de fluidez
$TiO_2$	Dióxido de Titânio
TRB	Transport Research Board
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i>
w B <sub>0</sub>	Teor de umidade correspondente ao ponto B <sub>0</sub>
w EAMI	Teor de umidade correspondente ao ponto EAMI
W <sub>L</sub>	Limite de liquidez
W <sub>ot</sub>	Umidade ótima
W <sub>p</sub>	Limite de Plasticidade
W <sub>s</sub>	Limite de Contração
ZM	Zona Mosqueada
$\gamma_d$	Peso específico aparente seco
$\gamma_{dmax}$	Densidade máxima
$\gamma_n$	Peso específico natural do solo
$\sigma_n$	tensão normal aplicada
$\tau$	tensão cisalhante
$\Phi$	Ângulo de Atrito
$\sigma$	Desvio padrão

# 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os diferentes tipos e graus de intemperismo que ocorrem em um perfil são responsáveis pela determinação das características físicas, químicas e mineralógicas do solo e, conseqüentemente, afetam seu comportamento geotécnico. Assim sendo, o conhecimento detalhado dos processos pedogenéticos formadores dos solos pode contribuir para um melhor entendimento do seu comportamento geomecânico.

Muitos índices têm sido propostos para quantificar os seus graus de intemperismo bem como, para caracterizar físico-química e mineralogicamente os solos. Contudo, pouca atenção tem sido dada a correlacioná-los com as propriedades de engenharia (Oliveira, 2006).

O principal motivador desta dissertação é a possibilidade de, por meio do uso de ferramentas estatísticas, buscar um melhor entendimento do comportamento dos solos tropicais, avaliando (i) as correlações entre os diversos parâmetros das caracterizações física, química e mineralógica dos solos; e (ii) a influência destas propriedades no comportamento mecânico dos mesmos.

## 1.1 *Objetivos*

O objetivo do presente estudo é, a partir dos dados obtidos por Cardoso (2002) e Delgado (2007) em suas pesquisas sobre os solos tropicais do Distrito Federal, avaliar a existência ou não de relação entre os diversos parâmetros físicos, químicos, mineralógicos e o comportamento mecânico dos solos, analisando se eles estão associados e, em caso positivo, avaliar o grau de associação.

Adicionalmente, espera-se que, com base nas análises realizadas e por meio de regressões, seja possível obter uma estimativa dos parâmetros geotécnicos partindo do conhecimento do valor de outras variáveis, levando-se em consideração a viabilidade técnica e econômica da obtenção dos parâmetros propostos para as análises. Os objetivos específicos são:

- Estudar os padrões de evolução químico-mineralógica nos solos tropicais.
- Contribuir para a definição de características físico-químico-mineralógicas e microestruturais que possam servir como indicadoras da evolução do grau de intemperismo.

- Avaliar quais as características dos solos que influenciam cada um dos parâmetros a serem analisados, em especial, os parâmetros referentes ao comportamento geomecânico dos solos.

## **1.2 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação apresenta no Capítulo 1 uma breve introdução sobre o estudo e seus objetivos.

O Capítulo 2 inclui a revisão bibliográfica e embasamento teórico, onde são apresentados conceitos sobre a formação dos solos, perfis de intemperismo, aspectos químicos, físicos e mineralógicos e o comportamento geotécnico dos solos tropicais. É feito ainda um resumo dos principais conceitos e técnicas de estatística utilizados nas análises conduzidas no presente estudo.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados. Basicamente, o escopo desse trabalho foi a utilização de ferramentas de estatística, notadamente correlações e regressões, para análise e discussão dos resultados dos ensaios realizados por Cardoso (2002) e Delgado (2007).

No Capítulo 4 é apresentado um breve resumo dos métodos de ensaio utilizados pelos autores citados e os resultados obtidos.

No Capítulo 5 é feito um resumo de algumas constatações e análises das relações entre parâmetros geotécnicos encontrados na bibliografia pesquisada. A fim de orientar as análises numéricas a serem conduzidas e evitar a obtenção de relações matemáticas que não refletissem adequadamente a interação das propriedades químicas, físicas, mineralógicas e geomecânicas dos solos pesquisados, a primeira etapa deste estudo consistiu no levantamento de conclusões e análises realizadas por diversos autores com base em dados e observações empíricas.

No Capítulo 6 constam os resultados das análises estatísticas realizadas. O Capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras. Por último, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas como embasamento para a realização deste estudo.



## 2. EMBASAMENTO TEÓRICO

Será apresentado nesse capítulo um resumo da revisão bibliográfica realizada como embasamento teórico para as análises realizadas nessa dissertação. Os principais tópicos abordados são: (i) características dos solos tropicais, (ii) perfis de intemperismo, (iii) gênese e caracterização químico, físico e mineralógica dos solos, (iv) classificação dos solos tropicais, (v) comportamento geotécnico dos solos tropicais e (iv) técnicas de análises estatísticas.

### 2.1 Solos Tropicais

De forma geral, em um perfil de solo tropical são normalmente encontrados dois tipos de horizontes, laterítico e saprolítico, podendo haver entre eles uma camada de transição, geralmente pouco espessa. O saprolítico (do grego *saprós* - podre, em decomposição) origina-se da decomposição da rocha matriz, geralmente mantendo a estrutura da rocha de origem. Constitui a camada subjacente aos horizontes lateríticos, logo abaixo da camada de transição, e é predominantemente heterogêneo, apresentando composição mineralógica variada que, dependendo do tipo de rocha matriz e do seu grau de intemperização, pode ser simples ou extremamente complexa.

Ao contrário dos solos de regiões temperadas, os solos residuais tropicais lateríticos sofrem um intemperismo tão intenso que dificilmente preservam as características das rochas de origem. Em função do clima quente e úmido das regiões tropicais, os solos são em grande parte espessos e sua fração argila é constituída essencialmente por óxidos e hidróxidos de ferro, de alumínio e argilo-minerais cauliníticos, materiais estes, genericamente designados como lateríticos.

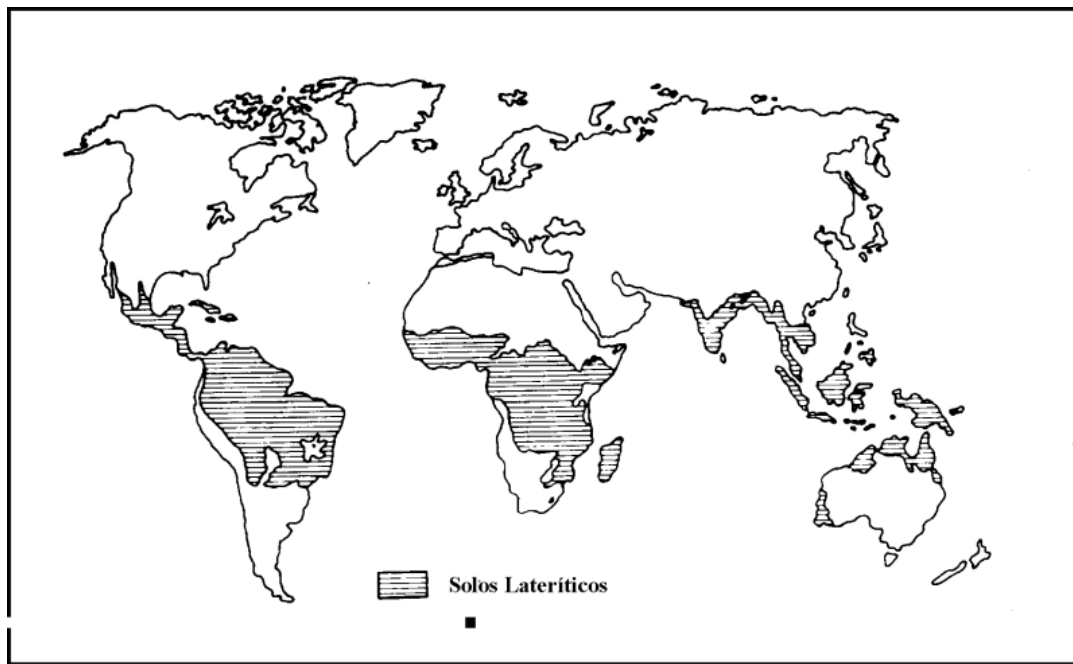
A primeira definição do termo laterita (do latim *later* - tijolo) foi dada por Buchanan em 1807 para descrever um material avermelhado, não estratificado, existente na região sul da Índia que podia ser cortado em blocos e apresentava a característica particular de endurecimento quando exposto ao ar (Lucena & Cabrera, 1990 em Rezende, 2003).

As lateritas podem englobar vários tipos de produtos que se diferenciam, por exemplo, pela intensidade e tempo de atuação dos processos de intemperismo ou pelo tipo

de material da rocha de origem. Sendo assim, as lateritas apresentam propriedades físicas, químicas e mineralógicas diferentes.

Os solos que apresentam o comportamento laterítico se caracterizam por serem, em geral, solos espessos, com textura homogênea ao longo do perfil, minerais em estado avançado de intemperismo, fração argilosa composta preferencialmente por óxidos de ferro (hematita e goethita), óxidos de alumínio (gibbsita e alumina) e minerais de argila do grupo 1:1 (caulinita e haloisita) e lixiviação de materiais insolúveis. Apresentam agregados estáveis e altos graus de floculação da fração fina, além de incorporarem matéria orgânica (humus) proveniente da decomposição da vegetação.

Condições de alta temperatura e forte umidade (características de regiões tropicais, limitadas a uma faixa balizada pelos paralelos 30°N e 30°S de latitude) favorecem a lateritização. A distribuição dos solos lateríticos sobre a superfície terrestre é apresentada na Figura 2.1.



*Superfície da Terra*

De acordo com Melfi e Pedro em Formoso (2006), os solos lateríticos cobrem aproximadamente 65% do território Brasileiro, prevalecendo em todas as regiões Amazônica, Central e Sudeste do país conforme mostrado na Figura 2.2.



**Figura 2.2: Distribuição dos solos lateríticos no Brasil**  
(Formoso, 2006).

## **2.2 Perfis de Intemperismo**

Com Carl Sprengel de 1830-1840 apareceram os conceitos de que o solo é função da influência do clima e dos seres vivos. Vasilí V. Dokuchaev, em 1887, após observações de solos na Rússia nas diversas latitudes foi o primeiro pesquisador a estabelecer relação entre o clima e a gênese e evolução do solo (Zimback, 2003).

Segundo Espindola (2000), daí surgiu um verdadeiro paradigma conhecido como “lei da zonalidade”, ensejando que em função do clima desenvolver-se-ia determinado tipo de solo e que a maneira de se conhecer e descrevê-los seria pelo seu “perfil” (corte vertical), contendo camadas distintas, mais ou menos horizontais e paralelas à superfície, por isso mesmo referidas por “horizontes”. A quantidade de horizontes e o nível de diferenciação dependem do grau de evolução do perfil e também do tipo litológico da rocha-mãe.

Os perfis raramente apresentam todos os horizontes ou mesmo em topossequência, sendo os mesmos geralmente truncados e apresentando a predominância de um ou mais horizontes.

Segundo a classificação morfo-genética, os horizontes são distinguidos por letras maiúsculas, onde os principais são denominados: O (orgânico), A, B, C e R (rocha), podendo ainda serem feitas subdivisões destas categorias, como por exemplo, a classificação proposta pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, de 1999 e reeditada em 2006, que tem como uma das características, a utilização do principalmente horizonte B como horizonte de diagnóstico. Um resumo das características principais desses horizontes é apresentado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1: Síntese das Classificações de perfis lateríticos completos.**

	<b>Classificação Morfo-Genética</b>	<b>Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (1999)</b>
<b>O</b>	Horizonte orgânico superficial constituído por detritos vegetais e substâncias húmicas acumuladas na superfície, em ambientes onde não há impedimento à drenagem. Ocorre, em geral, em áreas de florestas, distinguindo-se do horizonte mineral subjacente, pela coloração mais escura, e pelo conteúdo em matéria orgânica de, no mínimo, 20%.	
<b>A</b>	Horizonte mineral superficial ou subjacente ao Horizonte O, com a incorporação de matéria orgânica mineralizada. É o horizonte de maior atividade biológica, apresentando coloração escurecida pela presença de matéria orgânica. Existem vários tipos de Horizonte A, dependendo dos ambientes em que são formados, uns mais pobres em matéria orgânica e outros com maiores teores de compostos orgânicos.	
<b>B</b>	Horizonte mineral subsuperficial situado abaixo do Horizonte A. É considerado o horizonte mais importante na diferenciação das classes de solo, resultando de transformações relativamente acentuadas do material originário e/ou ganho de constituintes minerais e/ou orgânicos migrados de outros horizontes. Em perfis de solos lateríticos, normalmente sob o contato entre os horizontes B e C, podem ser encontrados os horizontes diagnósticos Plíntico e/ou Litoplíntico.	<b>Horizonte B latossólico (Bw)</b> - horizonte com pelo menos 50 cm de espessura, que apresenta alto grau de intemperismo químico. Apresenta-se geralmente, em solos profundos, friáveis, e com grande proporção de macroporos.
		<b>Horizonte B textural (Bt)</b> - horizonte com incremento da fração argilosa por processos de iluviação.
		<b>Horizonte B incipiente ou câmbico (Bi)</b> - horizonte com pequena espessura, raramente superior a 1 metro. Apresenta baixo grau de intemperismo químico, porém suficiente para o desenvolvimento de cor e/ou de estrutura (alguns podem ser maciços), dominando estruturas pedológicas. Apresenta minerais primários facilmente intemperizáveis, argila mais ativa, ou teores mais elevados de silte.

<b>C</b>	Horizonte mineral, relativamente pouco afetado pelos processos pedogenéticos mais superficiais, formado a partir da decomposição do substrato rochoso, não apresentando características diagnósticas dos horizontes A e B. Em perfis de solos lateríticos, normalmente junto ao contato com o horizonte B, pode ser encontrado o horizonte diagnóstico Glei.	<b>Horizonte plíntico</b> - horizonte mineral B (Bf) e/ou C com 15 cm ou mais de espessura, formado por 15% ou mais por volume de plintita. Pode-se definir plintita como uma formação constituída da mistura argila, pobre em húmus e rica em Fe e Al, com quartzo e outros minerais. Este material consolida-se irreversivelmente quando submetido a ciclos alternados de hidratação e desidratação, resultando na produção de material concrecionário neoformado, denominado petroplintita.
		<b>Horizonte litoplíntico</b> - é uma camada consolidada contínua ou praticamente contínua, endurecida por Fe e/ou Al, na qual a matéria orgânica está ausente. Este horizonte pode englobar uma camada muito fraturada, mas normalmente pode existir um predomínio de blocos com dimensões mínimas de 20 cm.
		<b>Horizonte glei</b> - é um horizonte subsuperficial ou eventualmente superficial, com espessura mínima de 15 cm, caracterizado pela intensa redução de Fe e formado sob condições de excesso de água, o que lhe confere cores neutras ou próximas a neutra na matriz do solo, com ou sem mosqueamentos. É um horizonte fortemente influenciado pelo lençol freático e regime de umidade redutor, virtualmente livre de oxigênio dissolvido em razão da saturação por água durante todo ano, ou longo período. Ele pode ser um horizonte C, B (Bg) ou mais raramente A.
<b>R</b>	Camada correspondente ao substrato rochoso.	

Fonte: Resumo de Delgado (2007) feito pela autora.

### ***2.3 Gênese e Caracterização de solos: aspectos químicos, mineralógicos e físicos.***

Intemperismo é um processo complexo compreendendo desagregação física, decomposição química e biológica dos minerais das rochas (biomineralização) no processo de transformação do maciço, levando a formação de rochas alteradas e solos. O grau de intemperismo varia de acordo com o clima (quantidade de chuvas e temperatura), topografia, natureza da rocha matriz (composição, textura e sistema de fissuras), condições de drenagem e influência da biosfera.

Vale ressaltar que o intemperismo não é necessariamente um processo destrutivo atuando também na formação de depósitos minerais tais como caulinita, bauxita, ferro, manganês, fósforo, ouro.

### **2.3.1 Aspectos físicos**

O intemperismo físico conduz à desagregação da rocha, sem que haja necessariamente uma alteração química dos minerais constituintes. Os principais agentes do intemperismo físico são: variação de temperatura, cristalização de sais, congelamento da água e atividades de seres vivos, conforme descrito abaixo:

- Variação da temperatura: Sendo o maciço rochoso composto por diferentes minerais, com o aumento da temperatura esses minerais sofrem dilatações distintas, desenvolvendo pressões internas que desagregam os minerais e desenvolvem microfaturas, por onde penetrarão a água, sais, microorganismos e raízes vegetais;
- Cristalização de sais: O sal trazido pela maresia ou de outras fontes, se cristaliza nas fraturas, desenvolvendo pressões que ampliam o efeito desagregador;
- Atividades biológicas: as raízes de árvores podem trabalhar como agentes intempéricos. Elas atuam como forma motriz para abrir canais para que outros agentes intempéricos atuem nas rochas. Ressalta-se que esse é o efeito físico da atividade biológica, existindo ainda o efeito químico.

Formoso (2006) enfatiza a importância do funcionamento do ciclo da água para os processos de alteração física na formação de solos favorecendo a ocorrência de erosão, transporte, depósitos marinhos ou lacustres e formação dos primeiros sedimentos.

Outro fator importante para a formação dos solos tropicais é a remoção de bases (potássio, sódio, cálcio e magnésio) por arrastamento nas águas de infiltração, contribuindo para o caráter ácido destes solos. Os elementos alcalinos e alcalino-terrosos são, na maioria das vezes, totalmente lixiviados, enquanto que a sílica também é mobilizada, porém com velocidade mais baixa do que os alcalinos (Duarte *et al.*, 2002).

### 2.3.2 Aspectos mineralógicos

A decomposição química de rochas e minerais leva à transformação de minerais de estrutura complexa em estruturas mais simples. A formação de minerais tais como a caulinita, oxi-hidróxidos de ferro (hematita e goethita), e oxi-hidróxidos de alumínio (gibbista e boehmita) a partir de minerais mais complexos e somente estáveis sob altas temperaturas e pressões e a decomposição do feldspato em illita e sílica aquosa, são bons exemplos desta transformação, tal como descrito a seguir.



Em princípio, todos os minerais estão sujeitos a intemperização, entretanto, os metais primários tendem a ser mais vulneráveis. Vale ressaltar, porém, que a resistência dos materiais é determinada pela sua granulometria e pelas condições ambientais, além de, evidentemente, sua própria natureza.

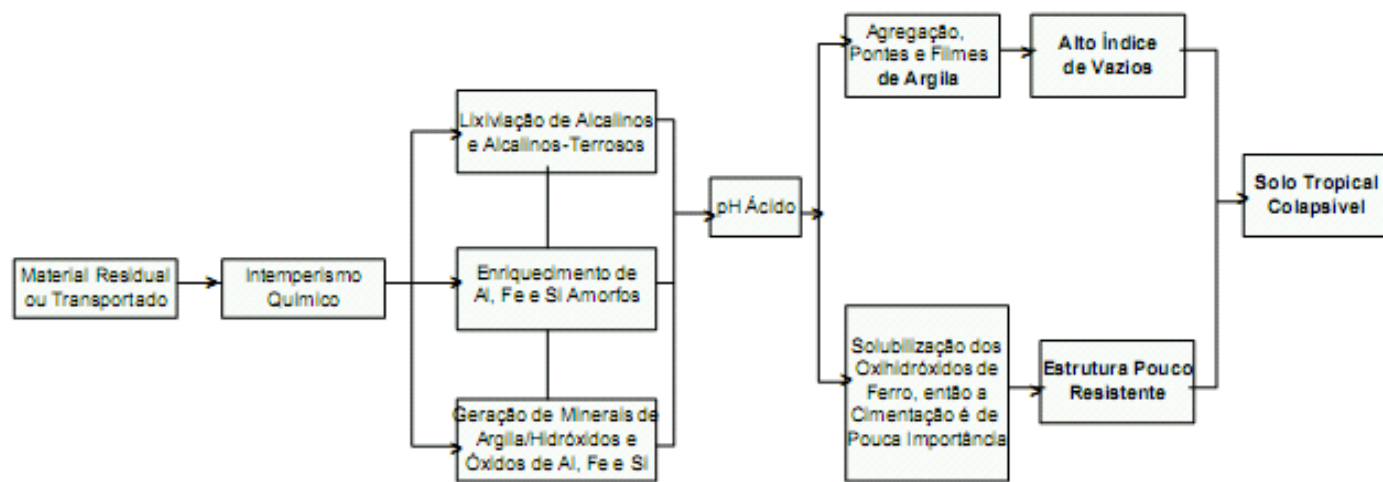
Com a análise mineralógica é possível estudar a gênese e a evolução do solo com base na relação entre os minerais primários remanescentes e de neoformação presentes nas diversas frações granulométricas dos solos, uma vez que os constituintes minerais das rochas não se decompõem com a mesma intensidade por apresentarem diferentes graus de estabilidade (Oliveira, 2006).

Para estas análises são propostos índices de intemperismo dos solos, como por exemplo, os índices Ki ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e Kr ( $(\text{SiO}_2/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3))$ ) propostos por Harrassowitz em Jenny (1941). Entretanto, esses índices são baseados na quantidade de sílica total e, considerando que a sílica, apesar de ser um material primário tem concentração altamente estável se usados para avaliar o grau de intemperismo de rocha ácidas podem não fornecer bons resultados, por não refletirem adequadamente a transformação dos demais minerais.

Oliveira (2006) ressalta também que os índices mineralógicos devem ser escolhidos em função do tipo de rocha e clima da região e são utilizados para avaliar, dentro de uma

mesma formação, o grau de alterabilidade do solo, não devendo ser aplicados como referências comparativas entre duas formações distintas.

Cardoso (2002) avalia que grande maioria dos solos tropicais apresenta uma evolução químico-mineralógica semelhante, baseada em processos de intemperismo físico, químico e biológico da rocha matriz e, com base nos resultados obtidos nos seus estudos dos solos de Brasília, propõe um Modelo de Evolução Químico-Mineralógica dos Solos Tropicais Colapsíveis, conforme apresentado na Figura 2.3.

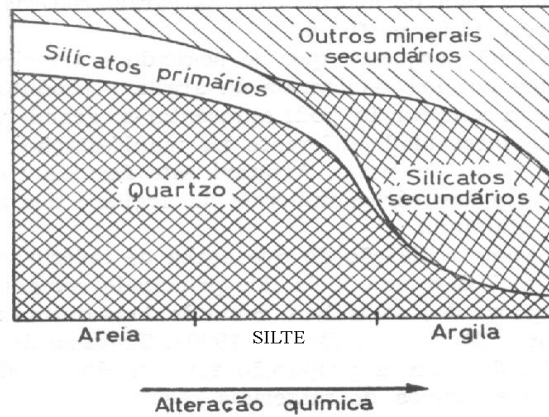


**Figura 2.3: Evolução Químico-Mineralógica dos Solos Tropicais Colapsíveis.**  
(Cardoso, 2002)

O óxido de ferro é cristalizado como hematita na época seca e como goethita em um ambiente constantemente úmido, resultando num solo de cores predominantemente vermelhas (hematita) ou amarelas (goethita). A gibbsita é o principal óxido de alumínio formado.

A Figura 2.4 apresenta uma idéia dos principais componentes minerais das frações granulométricas do solo segundo Macedo & Lemos (Cardoso, 2002). O objetivo é estabelecer aproximadamente a proporção relativa dos principais produtos resultantes da alteração das rochas quais sejam: minerais muito resistentes (ex. biotita e quartzo); silicatos primários (minerais facilmente alteráveis); silicatos secundários (minerais derivados dos primários e cuja alteração é lenta: feldspato e muscovita) e outros minerais secundários (óxidos de Fe e Al).





**Figura 2.4: Principais componentes minerais dos solos (Cardoso, 2002).**

### 2.3.3 Aspectos químicos

#### 2.3.3.1 Intemperismo orgânico e o controle do pH.

As soluções de alteração que ocorrem nos meios tropicais são caracterizadas por altas concentrações de CO<sub>2</sub> provenientes da degradação da matéria orgânica. A diluição/concentração dos ânions provenientes da degradação da matéria orgânica confere às soluções pH característicos levemente ácidos (pH 5,5 a 6,0).

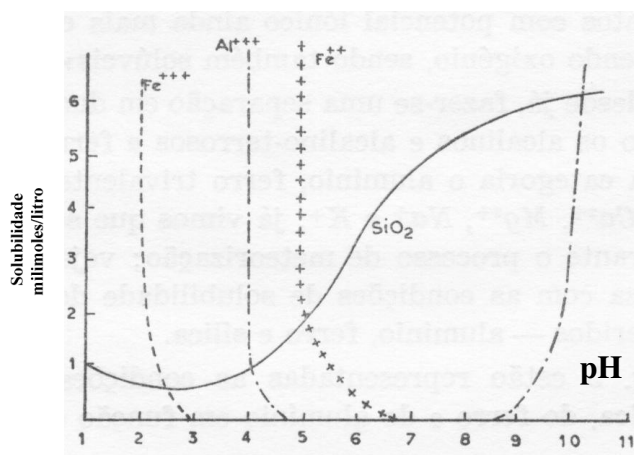
Os ácidos produzidos pela decomposição bacteriana de vegetais interagem com os minerais das rochas, colaborando para a alteração química dos mesmos. O CO<sub>2</sub> encontra-se dissolvido na água como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> e H<sup>+</sup> e participa das reações de hidrólise dos minerais, como por exemplo na formação da gibbsita e goethita, bem como na dissolução dos silicatos minerais, como mostrado no Tabela 2.2.

**Tabela 2.2: Exemplos de reações de hidrólise de minerais**

$\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2 \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2 \text{Al}(\text{OH})_3 + 2 \text{SiO}_2(\text{aq}) + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{OH}^-$		
<b>Caulinita</b>	<b>Gibbsita</b>	<b>Sílica</b>
$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2 \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2 \text{FeOOH} + 2 \text{CO}_2 + 2 \text{OH}^-$		
<b>Hematita</b>	<b>Goethita</b>	
$\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 11 \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{K}^+_{\text{aq}} + 2 \text{OH}^-_{\text{aq}}$		
<b>Feldspato</b>	<b>Caulinita</b>	

Geralmente, sem a presença de matéria orgânica e vegetação, a hidrólise de silicatos predomina. Assim sendo, há maior presença de OH<sup>-</sup> do que de ácidos orgânicos e o pH torna-se básico, a exemplo do que ocorre em regiões semi-áridas.

O pH ácido é fundamental no controle do comportamento dos principais elementos constituintes dos minerais formadores das rochas (alumínio, silício, ferro, alcalinos e alcalino-terrosos). Segundo Cardoso (2002), em condições de pH ácido, o alumínio e o ferro são praticamente insolúveis, acumulando-se na forma de óxidos e hidróxidos e, por conseguinte, os mesmos tendem a permanecer *in situ*. A mobilização do Fe, Al e Si em função do pH das soluções de alteração é mostrada na Figura 2.5.



**Figura 2.5: Mobilização do Fe, Al e Si em função do pH.** (Cardoso, 2002)

### 2.3.3.2 Hidrólise

A hidrólise pode ser mais ou menos completa, de acordo com as condições termodinâmicas reinantes, e, com isso, o grau de eliminação dos elementos químicos, caracteriza os diferentes tipos de hidrólise. As características da reação hidrolítica são resumidas na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3: Características geoquímicas e cristalóquímicas da alteração hidrolítica**

GRAU DA HIDRÓLISE	Hidrólise total	Hidrólise parcial	
<i>Geoquímica da dessilicatação</i>	Dessilicatação total : sílica e bases são eliminadas.	Dessilicatação parcial: parte da sílica liberada do mineral primário reage com o alumínio para formar “sais básicos” insolúveis.	
<i>Mineralogia</i>	Gibbsita	Tipo 1:1 (caulinita)	Tipo 2:1 (esmectita)
<i>Processo de alteração</i>	Alitização	Monossilitização	Bissalitização
<i>Geoquímica da desalcalinização</i>	Desalcalinização total		Desalcalinização parcial

Fonte: (Melfiem Cardoso, 2002 adaptada).

### 2.3.3.3 Queluviação

Segundo Carvalho (1995) em Cardoso (2002), a queluviação é o processo em que os elementos metálicos, de maneira especial o alumínio e o ferro-férrico ( $Fe^{3+}$ ), são móveis em relação a sílica que, neste tipo de intemperismo, tende a se concentrar no perfil de alteração. A saída do perfil de alteração de elementos metálicos dá-se principalmente sob a forma de quelatos (complexos orgânicos).

- **Queluviação total** - ocorre com a total saída de bases e do alumínio, este último complexado. A alteração requer condições de acidez relativamente alta, na qual a atividade de  $H^+$  na solução reagente e percolante tende ser maior que a concentração molar do  $Al^{3+}$  a ser liberado. O material residual será um produto silicoso.
- **Queluviação parcial** - além da permanência da sílica, existe uma retenção parcial do alumínio e mesmo de algumas bases, tais como o K e o Mg. A solução meteórica percolante não é tão ácida como no caso precedente, de forma que a concentração molar do  $Al^{3+}$  liberado pode ser igual ou maior que a atividade do  $H^+$  dessa solução. Como há uma retenção parcial de Al, temos, pela sua redistribuição no perfil, a formação de argilo-minerais 2:1 ou do grupo das esmectitas e o processo chama-se Aluminossilitização.

## **2.4 Ensaios para classificação dos solos Tropicais – Metodologia MCT**

A necessidade de inferir preliminarmente as propriedades geotécnicas dos solos (mecânicas e hidráulicas) para sua posterior utilização como material de construção em rodovias motivou o desenvolvimento de diversos sistemas de classificação. As classificações geotécnicas convencionais baseiam-se nos ensaios de granulometria e limites de Atterberg (Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade). Dentre as classificações mais utilizadas destacam-se a classificação USCS (*Unified Soil Classification System*), derivada da classificação de Casagrande (1948), e a classificação HRB (*Highway Research Board*), também conhecida como classificação da AASHTO. Entretanto, deve-se destacar que estas classificações foram desenvolvidas em países de clima temperado, apresentando significativas limitações e incompatibilidades quando aplicadas aos solos tropicais.

Nesse sentido, diversos autores têm investigado e discutido as limitações das classificações geotécnicas convencionais. Algumas destas limitações estão associadas às diferenças existentes entre a natureza das frações argila e areias, de solos de regiões tropicais e regiões temperadas, para as quais tais classificações foram desenvolvidas.

A fração de argila dos solos lateríticos possui óxidos de ferro e/ou alumínio hidratados, bem como argilo-minerais, que conferem baixa expansibilidade e alta capacidade de suporte quando compactados, não sendo encontrados em solos não lateríticos. A fração arenosa dos solos lateríticos pode conter elevada porcentagem de concreções de resistência inferior à da areia tradicional (essencialmente quartzo). A presença de mica e/ou de feldspato nos solos saprolíticos reduz a densidade seca, a capacidade de suporte e o índice de plasticidade, aumentando o teor de umidade ótima e a expansão do solo (Fortes, 1999).

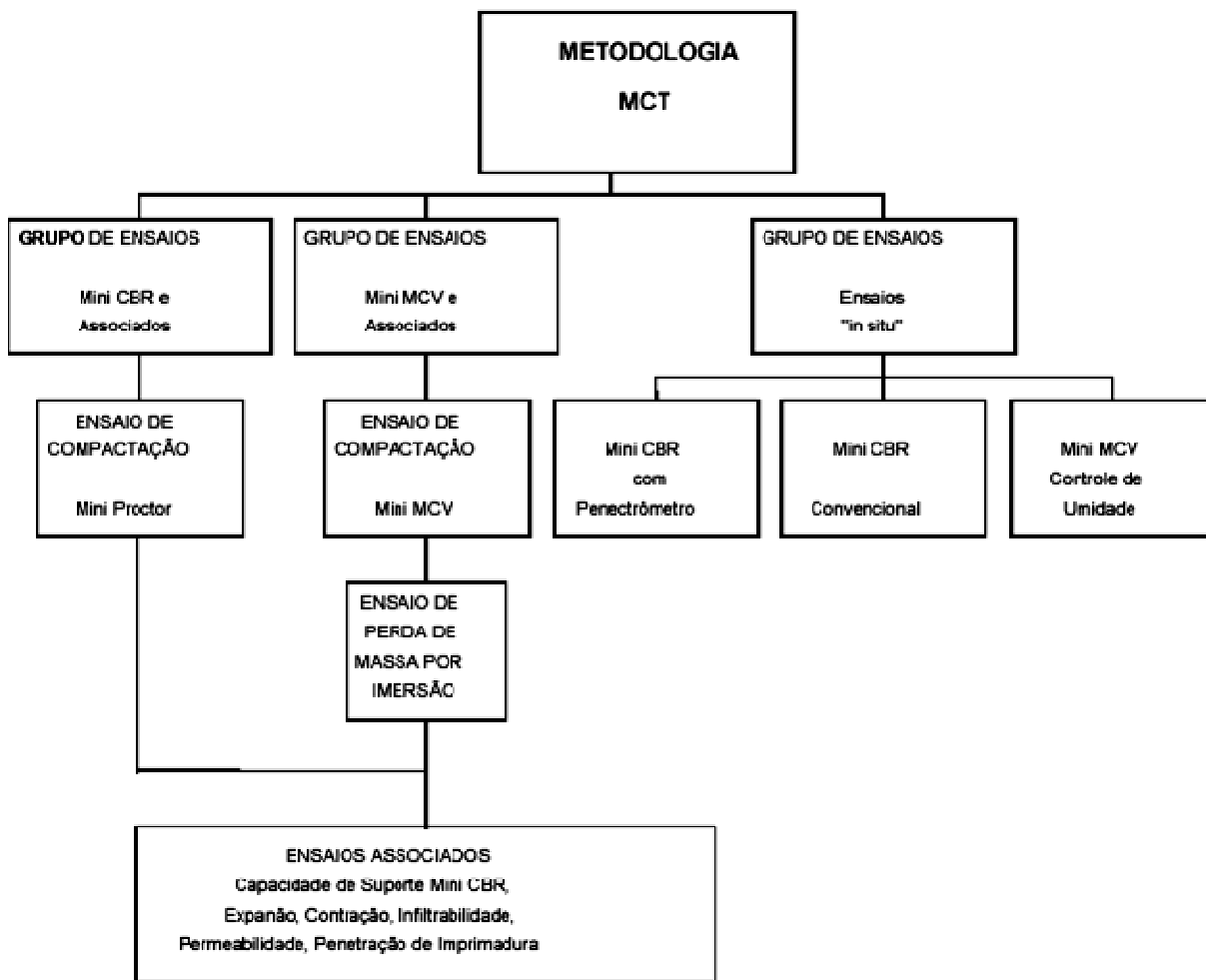
Considerando as dificuldades e deficiências das classificações convencionais em relação aos solos tropicais, foi desenvolvido por Nogami e Villibor, no início da década de 80, o método MCT de classificação de solos tropicais. A designação MCT (Miniatura Compactada Tropical) é proveniente da utilização de ensaios com amostras de solos tropicais compactados de dimensões reduzidas (corpos de prova com 50 mm de diâmetro). De maneira geral, a metodologia abrange a realização de dois grupos de ensaios:

- Mini CBR e associados;
- Mini MCV e associados.

A partir dos ensaios de mini CBR e associados pode-se obter as características dos solos apropriados para base de pavimentos. Os procedimentos deste ensaio indicam que, após a compactação dos corpos de prova, podem ser determinadas uma série de propriedades dos solos, tais como: capacidade de suporte (Mini CBR), expansão, contração, infiltrabilidade e permeabilidade.

Já os ensaios Mini MCV e associados fornecem parâmetros para a determinação dos coeficientes  $c'$  e  $e'$ . Estes coeficientes são utilizados para classificação dos solos de acordo com a proposta de classificação MCT, além de permitirem a determinação de todas as propriedades referidas nos ensaios Mini CBR e associados (Fortes, 1999). A Figura 2.6 apresenta os principais ensaios utilizados na metodologia MCT.

A classificação MCT divide os solos em duas grandes classes de comportamento, laterítico e não-laterítico, as quais se subdividem em sete grupos, sendo eles: LG' - argilas lateríticas e argilas lateríticas arenosas; LA' - areias argilosas lateríticas; LA - areias com pouca argila laterítica; NG' - argilas, argilas siltosas e argilas arenosas não-lateríticas; NS' - siltes caulínicos e micáceos, siltes arenosos e siltes argilosos não-lateríticos; NA' - areias siltosas e areias argilosas não-lateríticas; NA - areias siltosas com siltes quartzosos e siltes argilosos não lateríticos.



**Figura 2.6: Diagrama de ensaios MCT (Fortes, 1999)**

Como principal desvantagem, a sistemática MCT apresenta algumas dificuldades referentes à complexidade e morosidade dos processos de ensaio e cálculos a serem realizados. Além disso, a classificação só se aplica aos solos que passam integralmente na peneira 2,00mm, o que não permite classificar solos de granulometria mais grosseiras. Adicionalmente, deve-se destacar como limitação desta metodologia o fato de não ser possível estimar outras propriedades geotécnicas de interesse em outros tipos de obras de terra que não sejam obras viárias.

## **2.5 Comportamento Geotécnico dos solos tropicais**

Diversos estudos estão sendo conduzidos na tentativa de avaliar como a estrutura físico-mineralógica influencia no comportamento geomecânico destes solos. Nogami *et al.* (1993) afirmam que no estado natural, quanto maior o grau de laterização (i) menor a sua susceptibilidade à erosão, (ii) menor capacidade de suporte, (iii) elevada deformabilidade, (iv) excelentes condições de drenagem (altamente permeáveis) e (v) possibilidade de colapso quando submetido a determinadas cargas e molhagem.

Cardoso (2002) afirma que o grau de intemperismo está diretamente associado à composição mineralógica dos solos, que, por sua vez, determina as suas propriedades físicas. Ainda segundo o autor, o colapso dos solos entre outras propriedades é consequência do arranjo estrutural dos mesmos e que por sua vez é resultado direto de sua química e mineralogia, originada basicamente durante a evolução intempérica.

Observa-se então que, as condições climáticas em que os solos são formados, assim como os diferentes graus de intemperização a que são submetidos, têm influência marcante nas propriedades geotécnicas dos solos, nomeadamente, plasticidade, permeabilidade, expansibilidade, compressibilidade e resistência, e suas análises possibilitam a compreensão das razões pelas quais solos com índices geotécnicos semelhantes apresentam comportamentos mecânico e hidráulico distintos.

Duarte *et al.* (2002) fazem uma análise comparativa dos resultados obtidos para os dois solos residuais graníticos do sul de Portugal que resultam da alteração de granitos calco-alcalinos de composição química semelhante, mas a sua formação teve lugar em condições geomorfológicas e climatéricas diferentes - o solo residual de Marvão que fica localizado numa zona de relevo acidentado e pluviosidade considerável, condições que favorecem a drenagem e lixiviação nos solos e o solo residual de Pias que ocorre numa região plana e com valores de precipitação média anual muito baixos, dificultando a drenagem e a lixiviação e mobilização dos elementos minerais. Tais diferenças promoveram o aparecimento de minerais de neoformação ou secundários distintos, que

influenciam significativamente as propriedades geotécnicas dos solos residuais referidos, principalmente, plasticidade, atividade, expansibilidade e coesão.

Com os resultados dos estudos efetuados os autores chamam a atenção para a influência que as partículas mais finas dos solos residuais têm no seu comportamento geotécnico e daí a importância da composição mineralógica como sendo parâmetro importante a ter em conta para a classificação geotécnica dos solos residuais. Por outro lado, o estudo vem reforçar a idéia de que fatores, tais como o relevo e o clima, condicionam mais o tipo de minerais de neoformação ou secundários existentes nos produtos de alteração, e conseqüentemente a natureza dos solos residuais e respectivas propriedades físicas e mecânicas, do que propriamente o tipo de rocha-mãe.

Nogami & Villibor (1995) observaram que os solos lateríticos se caracterizam pelo ramo seco da curva de compactação muito inclinada, elevado grau de saturação quando compactados na densidade máxima, valores de suporte elevados, baixa perda de suporte por imersão, baixa permeabilidade, lento deslocamento da frente de umidade, baixa perda de massa por imersão, baixa expansibilidade quando em contato com água livre, contração apreciável por perda de umidade e possibilidade de elevado módulo de resiliência.

Em relação à microestrutura dos solos tropicais, um ponto que vem sendo discutido por diversos autores é a importância da cimentação por óxidos de ferro e/ ou alumínio no comportamento geotécnico dos solos. O comportamento dos solos lateríticos é largamente dependente dos seus constituintes finos, isto é, constituintes da fração argila, e da cimentação dos mesmos pelos óxidos de ferro e/ ou alumínio.

Godoy & Bernucci (em Delgado (2007), complementam observando que, a principal peculiaridade dos solos tropicais lateríticos (que os diferencia dos solos de clima temperado), é justamente a presença desta cimentação natural causada pelos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. No entanto, Cardoso (1995), estudando solos lateríticos do Distrito Federal, observou microestruturas em que os solos apresentaram níveis de cimentação por óxidos de ferro e alumínio bastante baixos.



## 2.5.1 Resumos das propriedades dos solos tropicais

A seguir é apresentado um resumo das principais propriedades físicas dos solos e algumas correlações identificadas por diversos autores em suas pesquisas.

### 1. Textura

- Tanto os solos finos quanto os granulares podem ter a textura formada por agregados. Quanto maior o intemperismo e clima tropical, maior o teor de agregados.
- Os agregados podem ser interligados por pontes de argila e/ou oxi-hidroxidos de ferro e alumínio.
- A estabilidade dos agregados depende de sua composição química e do nível de intemperismo sofrido pelo solo.
- Os agregados podem ser formados por uma ou mais frações granulométricas.

**2. Plasticidade:** Propriedade de certos solos serem moldados sem variação de volume.

- Normalmente a natureza mineralógica e o teor da fração fina, são os principais fatores que definem a plasticidade de um solo. Um fator também muito importante na plasticidade dos solos tropicais é o seu teor em oxi-hidróxidos de ferro (Queiroz de Carvalho, 1987).
- Independente da origem do solo, os limites de plasticidade e liquidez aumentam à medida que aumentam os teores de argila no solo.
- Se o ferro presente no solo ocorre associado às partículas finas, recobrando-as ou mesmo cimentando-as, a plasticidade é afetada por uma redução nos valores dos limites de liquidez e de plasticidade (Gidigas, 1976).
- Ao se inserir elementos amorfos de sílica e ferro em solos naturais em diferentes proporções, ocorre um acréscimo dos limites de Atterberg em função do aumento da superfície específica no solo tratado.
- O revestimento das partículas do solo por oxi-hidróxidos de ferro reduz a capacidade dos minerais de argila em absorver água e pode, também, fisicamente cimentar grãos adjacentes, produzindo, assim, agregados maiores. Ambos os fatores reduzem a plasticidade, mas o intenso amolgamento do solo destrói agregados e revestimentos de oxi-hidróxidos.

**3.A. Limite de liquidez ( $W_L$ ):** Umidade onde o solo perde sua capacidade de fluir.

- Se o ferro ocorre no solo como partículas discretas ou parcialmente discretas, tem efeito em escala reduzida sobre os valores dos limites de plasticidade e liquidez (Queiroz de Carvalho, 1987).

**3. B. Inclinação curva de fluidez ( $tg\beta$ )**

- Nos solos tropicais, geralmente a curva de fluidez muda de inclinação em torno de 25 golpes.

**4. Limite de Plasticidade ( $W_p$ ):** Umidade onde o solo se desmancha ao ser trabalhando.

- Paul e Barras (1999) mostram que a extração da matéria orgânica de solos pobres neste componente, reduz o limite de liquidez e o índice de plasticidade a valores mais comensuráveis à mineralogia dos solos, enquanto que no limite de plasticidade a redução é menor. Isto demonstra que a plasticidade aumenta de acordo com o crescimento do teor de matéria orgânica em um solo.
- Delgado (2007), ao estudar os solos do DF, observa ainda que os limites de liquidez e de plasticidade dos solos (HB) são sempre superiores aos encontrados nos solos (ZM) e solos (SF). Os índices de plasticidade (IP), em contraposição, fornecem resultados onde os valores obtidos são, em média, menores para os (HB) e, maiores para os (ZM) e (SF).

**5. Limite de Contração ( $W_s$ ):**

- Umidade a partir da qual a amostra não reduz mais de volume quando em processo de secagem.
- O limite de contração obtido no ensaio de contração integrante dos limites de Atterberg (ABNT, ASTM) realizado sobre amostra amolgada passando na peneira # 40 é, nos solos tropicais profundamente intemperizados, geralmente superior ao limite de plasticidade, o que contraria a proposta estabelecida por Atterberg para os estados do solo (líquido, plástico, semi-sólido e sólido).
- O limite de contração determinado segundo as normas supra-indicadas se prestam a avaliar o potencial de contração do solo, mas não permite avaliar a contração de um solo

tropical em estado natural, pois este conta com outros elementos como cimentação e agregação.

**6. Índice de Plasticidade ( $I_p$ ):** Segundo Atterberg, a plasticidade de um solo seria definida por um índice:  $I_p = W_L - W_p$ .

- Em solos formados em regiões tropicais, os principais constituintes argilo-minerais são os dos grupos da caulinita, illita e montmorillonita. A illita possui os limites de plasticidade, liquidez e o índice de plasticidade, superior à caulinita; ambas possuem estes valores bastante inferiores à montmorillonita (Baver *et al.*, 1972).
- De forma a verificar o efeito destes oxi-hidróxidos de Fe, Cardoso (2002) procedeu à extração da goethita e parte da hematita, além dos amorfos e paracrystalinos, por meio do uso de citrato de sódio e ácido cítrico. Com a extração foi verificado que tais componentes incrementam a plasticidade, aumentando os limites de Atterberg ( $w_L$  e  $w_p$ ) e diminuindo os índices de plasticidade ( $I_p$ ). Não obstante, o autor ressalta ainda que a variação quanto ao  $w_p$  não é constante, provavelmente porque este pode ser resultante de combinações mais complexas entre as propriedades dos solos.

**7. Índice de Atividade ( $I_A$ ):** Propriedade que algumas argilas têm de transmitir ao solo uma maior ou menor plasticidade e coesão. ( $I_a = I_p / \% \text{argila}$ )

- Essa proposta de Skempton quando aplicada a solos tropicais profundamente intemperizados deve ser analisada com dois enfoques: a análise da atividade mineralógica total em que se deve usar o teor de argila real obtido após a desagregação do solo por uso de defloculante ou a análise da atividade mineralógica efetiva em que se deve usar o teor de argila aparente determinado com o solo em estado agregado. O uso de um ou outro coeficiente dependerá da finalidade e do próprio solo. Por exemplo, em um solo a ser estabilizado com cal e cujo pH seja menor que o correspondente ao ponto isoelétrico interessa o primeiro caso, mas se for maior, interessa o segundo pois no primeiro caso a adição de cal o desagregará e no segundo caso não, propiciado assim consumo de cal distintos.

**8. Índice de Consistência ( $I_C$ ):** Definido como a maior ou menor dureza com a qual uma argila é encontrada na natureza.  $I_C = (w_L - w) / I_p$ .

**9. Densidade dos grãos (G):** É definido como o peso total do solo dividido pelo volume dos sólidos.

- O valor de G aumenta com o teor de ferro no solo.
- Nos solos profundamente intemperizados, G tende a variar com o tamanho do agregado.
- A variação do G de solo para solo e ao longo do perfil de intemperismo torna esse índice menos importante na avaliação do estado do solo.

**10. Peso específico natural do solo ( $\gamma_n$ ):** É definido como o peso total do solo dividido pelo seu volume total.

- Na condição não-saturada, como a umidade de equilíbrio varia ao longo do ano esse parâmetro perde a importância.

**11. Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ):** É definido numericamente como o peso dos sólidos dividido pelo volume total.

- Para os solos estudados por (Delgado, 2007), os valores de peso específico apresentaram, em média, valores menores para os solos mais intemperizados. Entretanto, Cardoso (1995) e Araki (1997), ressaltam que, em função do elevado teor de  $Al^{+3}$  que ocorre com o aumento do grau de intemperismo, o  $\gamma_d$  pode aumentar com o intemperismo.

**12. Índice de vazios (e):** É a razão entre o volume de vazios  $V_v$  e o volume ocupado pela parte sólida ( $V_s$ ) do solo ( $e = (V_v / V_s) - 1$ ).

- Índices de vazios de solos lateríticos são normalmente maiores do que seria o associado com a distribuição granulométrica convencional, sendo uma função do processo de intemperismo e não está relacionada à história de tensões; porém, a distribuição granulométrica do solo em estado agregado pode oferecer maior aproximação entre as duas situações.
- O índice de vazios de solos lateríticos pode variar bastante, independente da rocha-mãe.

- O índice de vazios dos solos profundamente intemperizados deve ser tratado separando-se a fase dos macroporos daquela dos microporos quando se vai analisar o comportamento dos solos, assim, por exemplo, o fluxo se dará majoritariamente pelos macroporos embora esses possam apresentar volume de vazios até menor que o dos microporos.
- Nos solos pouco intemperizado possuindo argilo minerais expansivos faz-se necessário eliminar toda e qualquer interferência da variação de vazios intercamadas da variação de vazios interpartículas se pretende-se avaliar o comportamento do solo a partir do índice de vazios.

**13. Porosidade (n):** É a razão entre o volume de vazios  $V_v$  e o volume total.

- O índice de vazios ( $e$ ) e a porosidade ( $\eta$ ), em geral, aumentam com o intemperismo. No entanto, no caso dos solos naturais, enquanto o volume total permanece constante no processo de intemperismo, o volume de sólidos tende a diminuir e o de vazios, por consequência, tende a aumentar.

**14. Microporosidade:** Porosidade interna aos agregados.

- Os solos profundamente intemperizados são caracterizados pela presença de agregados cujos vazios interiores compõe os microporos.
- O arranjo estrutura das partículas que compõe os agregados, sua cimentação e a própria microporosidade são definidores da estabilidade e deformabilidade dos agregados, geralmente, para sucções que superem 1000 KPa.
- Nos latossolos a compactação tende a fazer desaparecer o aspecto bimodal das curvas características. Contudo, percebe-se que quando a origem da macroporosidade é textural mais não proveniente dos agregados, mas da presença do quartzo, esse aspecto bimodal subsiste para baixas umidades de compactação (Delgado, 2007).

**15. Macroporosidade:** A estrutura e ligação inter-partículas (entre agregados).

- Os solos lateríticos normalmente mostram uma estrutura granular, onde as partículas de solo, principalmente a argila, formam agregados de vários tamanhos, envolvendo uma grande variação de tamanhos de poros, sendo na maioria maiores do que seria normalmente

associado com a distribuição granulométrica do solo (The Quarterly Journal of Engineering Geology Report, 1990).

- Para os estudiosos da área de geotecnia, ou para pelo menos a maioria deles, a formação desta estrutura agregada e porosa deve-se à forte presença dos oxi-hidróxidos de ferro, que quimicamente são responsáveis pela flocculação das partículas e suas ligações inter-partículas na forma de cimentantes.
- Em alguns solos lateríticos aluminosos, a alumina pode endurecer e cimentar a estrutura; todavia acredita-se que o ferro, e especialmente seu arranjo no perfil em relação aos outros constituintes, é o fator mais importante no processo de endurecimento e cimentação (Brito Galvão, 1993).
- Por desidratação, os colóides de ferro e secundariamente de alumínio, podem tornar-se completamente irreversíveis. É neste estágio que a cimentação inter-partículas torna-se importante. Todavia, diferentemente do que ocorre na ação flocculante, são os hidróxidos de ferro que possuem maior irreversibilidade diante da desidratação e, por conseqüência, são mais importantes como cimentantes que os hidróxidos de alumínio (Botelho da Costa, 1959).
- Em solos lateríticos, a lixiviação geralmente provoca a liberação de  $Al^{3+}$  da malha cristalina que passa a ocupar posições de troca. A forte retenção do íon trivalente corresponde fraca espessura da camada dupla e forte neutralização das cargas negativas das partículas coloidais, o que principalmente deve explicar o domínio do processo de flocculação em sistemas controlados por íons de  $Al^{3+}$  e  $H^+$  em comparação com solos saturados por  $Mg^{2+}$  e, sobretudo, com os saturados com  $K^+$  e mais ainda  $Na^+$  (Botelho da Costa, 1959).
- A flocculação por ácidos, além da influência do  $Al^{3+}$  e  $H^+$ , é facilitada pela redução da carga negativa resultante da própria influência do pH reduzido.
- A biota tem papel importante na formação dos macroporos dos agregados e, por conseqüência, da macroporosidade.
- Os comportamentos hidráulico e mecânico dos solos estão geralmente associados à macroporosidade.
- A pressão de entrada de ar nos macroporos geralmente se situa entre 5 a 10 KPa.

- Nos solos profundamente intemperizados, a presença de micro e macroporos em condições distintas da origem curvas características bimodais. Nos solos menos intemperizados a distribuição dos poros é bem graduada, não tendo que se falar em micro e macroporosidade isoladamente.
- Deve ainda ser ressaltado o modo distinto que se dá a influência do aumento da energia de compactação. No solo intemperizado, o aumento da energia de compactação diminui a macroporosidade, enquanto nos solos menos intemperizados, interfere na estrutura e, por consequência, nos mecanismos de expansão/retração do solo.
- O pH representa um fator importante na formação de agregados e, conseqüentemente, influencia o arranjo estrutural entre os sólidos do solo e define a distribuição dos vazios (Delgado, 2007).
- Segundo Cardoso *et al.* em Delgado (2007) os oxi-hidróxidos de Al cristalinos e paracristalinos, formados na alitização, são fundamentais no desenvolvimento de agregados de partículas finas e nas fracas ligações interestruturais dos latossolos do DF.

**16. Coesão (c):** É a resistência que a fração argilosa empresta ao solo, tornando-o capaz de se manter coeso em forma de torrões ou blocos.

- A coesão dos solos tropicais se deve em grande parte as cimentações e, quando não-saturados, também à sucção.

**17. Ângulo de Atrito ( $\Phi$ ):**

- A elevada porosidade dos solos profundamente intemperizados, sua característica colapsível com o aumento do estado de tensão e do teor de umidade gera por erro de interpretação principalmente nos ensaios de compactação direta, valores elevados requerendo cuidado na análise dos resultados de ângulo de atrito (Camapum de Carvalho e Gitirana, 2005).

**18. Permeabilidade (K):** Representa uma maior ou menor dificuldade com que a percolação da água ocorre através dos poros do solo.

- Os solos lateríticos geralmente apresentam permeabilidades mais altas do que seria associada à distribuição granulométrica, como resultado dos elevados índices de vazios, bem como, pela presença de macroporosidades do solo.

## **19. Sucção**

- A partir do conjunto de resultados obtidos, infere-se que quanto mais intemperizado é o solo, maior a diferença entre os resultados obtidos para a amostra compactada e as amostras indeformadas. A energia de compactação também mostrou influência mais marcante para os solos mais intemperizados.
- Nos ensaios realizados por Delgado (2007), notou-se que, de modo geral observa-se coincidência entre as curvas obtidas para as mesmas amostras compactadas para graus de saturação inferiores a 50%, o que dá a idéia que, após a desestruturação do solo com a compactação é a natureza química e mineralógica do solo, que prevalece em detrimento da porosidade.
- Ensaios realizados por Delgado (2007) indicaram que a trajetória de umedecimento conduz a valores de sucção inferiores aos que ocorreria em campo, subestimando a sucção matricial do solo e, assim, a capacidade de resistência do mesmo. A histerese parece depender do nível de intemperização pelo qual passou o solo.

As discussões aqui apresentadas são corroboradas por análises de diversos autores como, por exemplo, Cardoso (2002). Como conclusão de seu trabalho, o autor estabelece análises qualitativas sobre como o intemperismo influencia diversos parâmetros, como mostrado na Tabela 2.11, onde as setas apontando para a direita indicam aumento e para a esquerda a redução dos parâmetros analisados conforme o aumento do grau de intemperismo para solos residuais de rochas psamíticas, pelíticas e para solos plásticos.



<b>Rocha-Mãe</b>	<b>Rochas Psamíticas (arenosas)</b>	<b>Rochas Pelíticas (Finos)</b>
<b>Grau de Intemperismo</b>	<b>Direção do aumento</b>	<b>Direção do aumento</b>
<b>Propriedades Físicas</b>	—————→	—————→
Teor de argila	—————→	—————→
Teor de silte	—————→	←————
Densidade real dos grãos (G)	?	?
Peso específico natural ( $\gamma_o$ )	←————	←————
Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ )	←————	←————
Formação de agregados	—————→	—————→
Índice de vazios ( $e$ )	—————→	—————→
Macroporosidade	?	—————→
Microporosidade	—————→	—————→
	<b>Solos Plásticos</b>	
Limite de liquidez ( $w_L$ )	—————→	
Limite de plasticidade ( $w_P$ )	—————→	
Índice de plasticidade ( $I_P$ )	←————	
Índice de atividade ( $I_A$ )	←————	
Índice de consistência ( $I_C$ )	—————→	
Inclinação da curva de fluidez ( $tg\beta$ )		?
	<b>Solos Homogêneos</b>	
Coesão ( $c$ )	←————	
Ângulo de atrito ( $\phi$ )		?
Correlação ( $R^2$ ) entre as tensões normais ( $\sigma$ ) aplicadas e as tensões cisalhantes ( $\tau$ )	—————→	

? - Não existe relação ou não foi possível identificá-la.

**Tabela 2.11: Relação entre o grau de intemperismo e as propriedades físicas dos solos do Planalto Central Brasileiro (Cardoso, 2002).**

## **2.6 Análises Estatísticas**

A estatística é uma ciência que se dedica à coleta, análise e interpretação de dados e utiliza de teorias probabilísticas para explicar a frequência de fenômenos e para possibilitar a previsão desses fenômenos com base na sumarização e a interpretação de observações. A informação recolhida para as amostras analisadas pode ser depois generalizada para toda a população.

Entende-se por população o conjunto de todos os dados de unidades individuais, que podem ser pessoas ou resultados experimentais, com uma ou mais características comuns. Amostra é um subconjunto de elementos pertencentes a uma população. Ressalta-se, porém, que nem sempre as amostras são representativas da população de onde foram retiradas, podendo levar a inferências erradas ou a resultados enviesados. O objetivo da estatística é a produção da melhor informação possível a partir dos dados disponíveis e, em geral, realizada em três etapas:

- Concepção do experimento: planejamento da obtenção dos dados (observações), de forma a controlar a sua variabilidade.
- Sumarização dos dados coletados: organização, resumo, apresentação e interpretação dos dados.
- Inferência estatística: a partir da análise dos dados coletados, obtenção de conclusões sobre as características das fontes donde os dados foram retirados e/ou realização de previsões do comportamento/ocorrência em outras situações.

As análises estatísticas baseiam-se na medição do erro que existe na estimativa de quanto uma amostra representa adequadamente a população da qual foi extraída (erro amostral). Para uma análise adequada é importante compreender como o erro se comporta e a magnitude do mesmo.

### **2.6.1 Estatística Descritiva**

A estatística descritiva é uma ferramenta para descrever e sumarizar um conjunto de observações. A descrição dos dados coletados é comumente apresentada em Figuras ou relatórios com parâmetros descritivos e serve tanto a prospecção de uma ou mais variáveis para posterior aplicação em testes estatísticos quanto para a apresentação de resultados experimentais. A Tabela 2.4 apresenta os principais parâmetros utilizados na estatística descritiva.

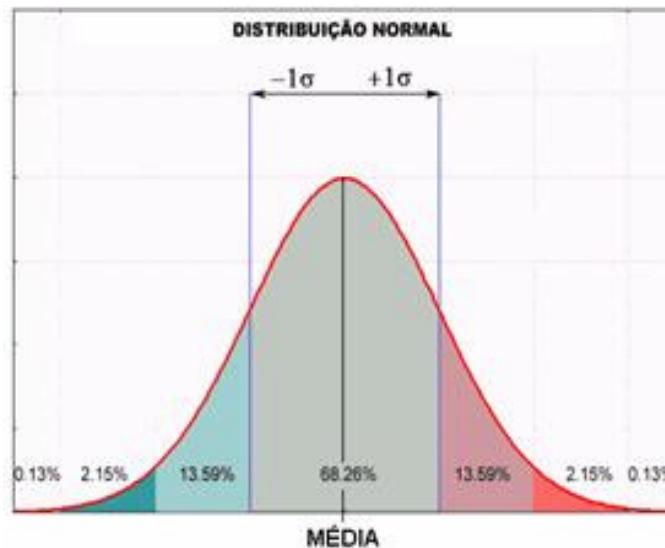
**Tabela 2.4: Principais parâmetros utilizados na Estatística Descritiva.**

Média	é o valor que aponta para onde mais se concentram os dados de uma distribuição. Pode ser considerada o ponto de equilíbrio das frequências, num histograma.	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Mediana	O valor intermediário que separa a metade superior da metade inferior do conjunto de dados. A mediana é menos sensível a valores extremos de um conjunto de observações, assim, é preferível usar a mediana a usar a média em situações onde o histograma do conjunto de valores for assimétrico, ou seja, quando houver predominância de valores discrepantes em uma das caudas.	
Variância	Quando a variação entre os dados é muito grande, a média não é suficiente para avaliar um conjunto de dados. A variância mede a diferença (dispersão) existente entre a média e os valores do conjunto. A unidade de variância é o quadrado da unidade de observação. Este fato é inconveniente e levou muitos estatísticos a usar a raiz quadrada da variância, conhecida como o desvio padrão, como um sumário da dispersão.	$S_i^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ii} - \bar{x}_i)^2}{n - 1}$
Desvio Padrao	Valor que quantifica a dispersão dos eventos sob distribuição normal, ou seja, a média das diferenças entre o valor de cada evento e a média central.	$\sigma = \frac{\sqrt{(Xi - \bar{X})^2}}{n - 1}$
Coefficiente de Variação	É uma medida de dispersão que se presta para a comparação de parâmetros diferentes. O desvio-padrão relativo à parâmetros com valores médios diferentes não é comparável sendo recomendado nesses casos usar o coeficiente de variação, que é igual ao desvio-padrão dividido pela média. O coeficiente de variação pode ainda ser multiplicado por 100, passando a ser expresso como percentagem.	$c_v = \frac{\sigma}{\mu}$

### 2.6.2 Distribuição Normal

A distribuição normal é um modelo estatístico para um grande número de fenômenos, e tem como parâmetros a média e a variância, os quais devem ser estimados (Assis *et al.*, 2002). Tem-se que, em uma distribuição normal perfeita, 68,26% das ocorrências se concentrarão na área do gráfico demarcada por um desvio padrão à direita e um desvio padrão à esquerda da linha média. Considerando-se dois desvios padrão, para a

direita e a esquerda da média, esse percentual sobe para 95,44% das ocorrências e para 99,72% quando considerados três desvios padrão, conforme apresentado na Figura 2.7.



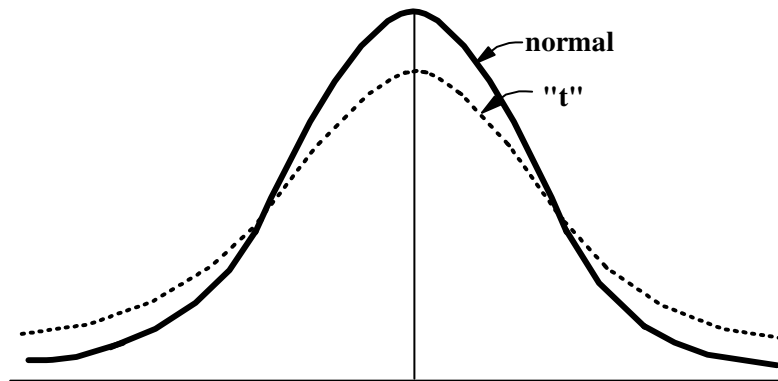
**Figura 2.7: Distribuição Normal**

Um evento aleatório é um evento cuja ocorrência individual não obedece a regras ou padrões que permitam fazer previsões acertadas sobre eles. A estatística mostra que, apesar de a ocorrência individual de eventos aleatórios ser imprevisível objetivamente, é possível tirar algumas conclusões a partir de um conjunto suficientemente grande deles (Lana, 2009). Ou seja, muitos dos conjuntos de eventos aleatórios apresentam padrões que não são identificáveis em cada evento isoladamente, mas considerando um grande número de eventos pode-se identificar a tendência desses de se concentrarem próximos a uma posição que representa uma média matemática deles.

Segundo o Teorema Central do Limite, toda soma de variáveis aleatórias independentes de média finita e variância limitada é aproximadamente normal, desde que o número de termos da soma seja suficientemente grande. Nesses casos, a quantidade de eventos diminui constantemente e gradativamente à medida que se afasta da média.

As estimativas para os parâmetros são números que dependem do conjunto de observações avaliadas (amostra), ou seja, com amostras diferentes são obtidas estimativas diferentes. Coletando-se uma amostra cada vez maior e fazendo mais estimativas, as avaliações de cada parâmetro estarão seguindo uma distribuição normal de probabilidades.

Para pequenas amostras (menores que 30 observações) é recomendável a utilização da distribuição "t" ou de Student. A forma desta distribuição é semelhante à da Normal, mas apresentando maior variância. Aumentando-se "n", a distribuição "t" tende à Normal, conforme ilustrado na Figura 2.8.



**Figura 2.8: Comparação entre as Distribuições Normal e a de Student (Assis et al, 2002)**

Para calcular o valor de "t" a ser usado é necessário ter um nível de confiança desejado ( $1-\alpha$ ) e o número de graus de liberdade a ser utilizado ( $n-1$ ), sendo o "n" o tamanho da amostra.

### 2.6.3 Análise de Variância

A técnica de comparar as médias de duas ou mais populações, através de testes de hipóteses utilizando a Distribuição de Fisher, é conhecida como Análise de Variância (ANOVA). O objetivo da Análise de Variância é comparar as médias de amostras e verificar se pertencem a populações que têm o mesmo valor da média (Assis *et al.*, 2002).

Como normalmente as médias amostrais são diferentes, pode-se atribuir esta diferença a duas fontes de variabilidade:

- Varição dentro da população: integrantes de uma mesma população podem ter médias amostrais diferentes. Nesse caso as amostras são diferentes, mas pertencem à mesma população. Quanto maior for essa variação, maior será a dificuldade para concluir se as amostras pertencem a uma mesma população.

- Varição entre diferentes populações (variabilidade entre populações): diferentes populações possuem médias amostrais distintas. Quanto maiores as diferenças entre as populações, mais fácil identificar de quais foram retiradas as amostras.

Para a Análise de Variância valem as seguintes premissas: as amostras são aleatórias e independentes, as amostras são extraídas de populações normais; e as populações normais possuem a mesma variância. Objetiva-se então, calcular a variância de duas maneiras diferentes e independentes, obtendo o valor de F (Distribuição de Fisher):

$$F = \frac{\text{Variância Entre}}{\text{Variância Dentro}} = \frac{S_E^2}{S_D^2}$$

Caso o valor de F seja menor que a unidade, as populações são definitivamente iguais. No entanto, se for muito pequeno (próximo de zero), deve-se suspeitar de tendenciosidade nas amostras, indicando ser imprópria qualquer conclusão sobre as amostras.

O teste de hipótese é feito comparando o valor F observado com aquele previsto para um dado grau de significância  $F\alpha$ . O valor de  $F\alpha$  pode ser obtido de tabelas ou de funções estatísticas do Excel.

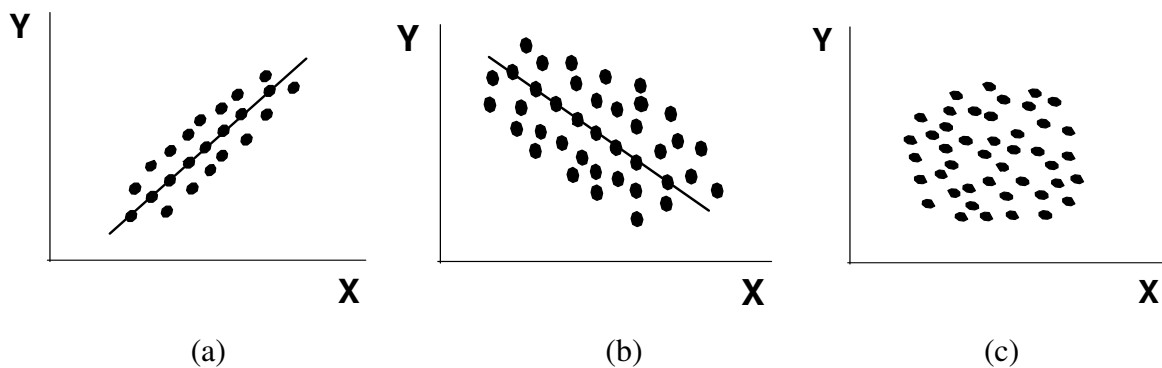
Em caso em que o valor de F observado seja maior que o valor crítico de  $F\alpha$ , concluí-se que as médias amostrais são significativamente diferentes, sendo razoável supor que pertencem a populações diferentes, para o grau de confiança  $(1-\alpha)$  adotado.

#### **2.6.4 Correlação**

Correlação é a verificação da existência e o grau de relação entre duas ou mais variáveis de um problema, que procura determinar quão bem uma equação linear, ou de outra espécie, descreve ou explica a relação entre as variáveis (Assis *et al.*, 2002).

O primeiro passo para análise da correlação entre duas variáveis é observar o diagrama de dispersão, que mostra a localização destes pontos em um sistema de coordenadas retangulares. De acordo com o relacionamento apresentados pelos pontos, pode-se inferir duas situações diferentes:

- **Correlação (Linear ou Não Linear):** se todos os pontos deste diagrama caem nas proximidades de uma reta ou curva, podendo ser positiva 2.9 (a), se  $y$  tende a aumentar quando  $x$  cresce ou negativa 2.9 (b), se  $y$  tende a diminuir quando  $x$  aumenta.
- **Incorrelacionadas:** se não há relação entre as variáveis, como na Figura 2.9 (c), diz-se que não há correlação entre elas.



**Figura 2.9: Exemplos de diagrama de dispersão**

Não obstante, a observação direta do diagrama de dispersão fornece apenas uma idéia qualitativa, da relação entre as variáveis. A avaliação quantitativa do problema da dispersão dos dados amostrais, em relação a retas ou curvas, exige o estabelecimento de medidas de dispersão.

Atualmente, utilizam-se várias técnicas para estudar o relacionamento entre um conjunto de variáveis, como: coeficientes de correlação de Pearson, de Spearman, Análise Fatorial, a Análise de Componentes Principais entre outros. Uma das mais utilizadas é a

expressão é conhecida como coeficiente de correlação linear de Pearson e é uma medida usada no estudo da relação linear existente entre duas variáveis X e Y.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum (x_i - \bar{x})^2)(\sum (y_i - \bar{y})^2)}} \quad (2.1)$$

Os valores limites de r são - 1 e + 1 e pode ser interpretado da seguinte forma:

- Se a correlação entre duas variáveis é perfeita e positiva, então  $r = + 1$ ;
- Se a correlação é perfeita e negativa, então  $r = - 1$ ;
- Se não há correlação entre as variáveis, então  $r = 0$ .

O grau de relacionamento entre as variáveis, pode ser assim interpretado:

r=0 ..... relação nula  
 0 < r ≤ 0,30 ..... relação fraca  
 0,30 < r ≤ 0,70 ..... relação média  
 0,70 < r ≤ 0,90 ..... relação forte  
 0,90 < r ≤ 0,99 ..... relação fortíssima  
 r=1 ..... relação perfeita

Landim (1998) em Cardoso (2002) descreve que quando diversas variáveis são medidas em uma amostra e se quer obter os diversos coeficientes de correlação, calculam-se tais coeficientes entre pares de variáveis ou, utilizando-se de cálculo matricial, obtém-se uma matriz de todos os coeficientes de correlação, chamada de Matriz de Coeficientes de Correlação Linear.

$$[r] = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & r_{1,3} & \dots & r_{1,n} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & r_{2,3} & \dots & r_{2,n} \\ r_{3,1} & r_{3,2} & r_{3,3} & \dots & r_{3,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n,1} & r_{n,2} & r_{n,3} & \dots & r_{n,n} \end{bmatrix}$$



É importante observar que, nem sempre uma elevada correlação entre duas variáveis representa a existência de relação de causa e efeito entre as mesmas. Para se afirmar que existe uma correlação estatística, é necessário fazer antes uma análise da existência de relação entre as variáveis, com base em fundamentos específicos de cada área de estudo, a fim de avaliar se as conclusões obtidas por métodos matemáticos são compatíveis com o comportamento observado para cada uma das variáveis.

### 2.6.5 Regressão

Regressão é o nome da técnica de ajuste de um modelo matemático (equação) a um conjunto de dados de diversas variáveis, onde  $n-1$  variáveis são independentes e uma é considerada dependente. Uma regressão pode ser:

- Regressão Simples: é o estudo do modelo de regressão com uma variável independente
- Regressão Múltipla: é o estudo do modelo de regressão com mais de uma variável independente, visando a uma melhor compreensão do comportamento da variável dependente.
- Regressão linear: a equação que melhor se ajusta aos dados modelados corresponde a uma reta ou, pelo menos, a análise dos dados deve sugerir um relacionamento linear entre as variáveis.
- Regressão não-linear: quando o relacionamento entre as variáveis não é linear e a equação que melhor se ajusta aos dados modelados não corresponde a equação de uma reta como, por exemplo, regressões polinomiais.

Segundo Assis *et al.* (2002) as etapas da análise de regressão são:

- Conhecidos um conjunto de valores da variável independente e outros das variáveis resposta, adota-se uma equação (modelo) e determina-se os parâmetros desta equação.
- Testa-se em seguida a aderência da equação, isto é, se o modelo fornecido pela equação descreve bem as observações. Pode-se então concluir pela adequação do modelo e adotá-lo,

ou concluir que ele não é satisfatório e testar outro, voltando à etapa inicial e repetir todo o processo.

- Obtida uma equação razoável pode-se utilizá-la para resolver os problemas como a predição do valor da variável resposta, sua verificação e controle.

Através da técnica de regressão é sempre possível encontrar uma equação que ajuste os dados encontrados para as variáveis dependentes e independente. A confiabilidade global do resultado de uma regressão depende da formulação do modelo. Segundo Modelo Clássico de Regressão Linear alguns pressupostos gerais acerca da correta especificação do modelo e da medição dos erros das variáveis observadas devem ser observados (Gujarati, 2000):

- O modelo é linear nos parâmetros;
- Os valores de X são obtidos em amostragem repetida (não estocásticos);
- O valor médio do erro é zero;
- O modelo está corretamente especificado tanto em relação as variáveis consideradas quando à formulação matemática (linear, logarítmica, polinomial);
- Homoscedaticidade: a variância do erro da estimativa de Y é constante para qualquer valor de X;
- Variabilidade suficiente em valores dos regressores;
- O número de observações deve ser maior que o de variáveis.
- Ausência de correlação serial, ou seja, dado os valores de X as correlações entre os erros é zero. O não atendimento desta condição pode levar a subestimação do erro da regressão e superestimação do  $R^2$ .
- Não existe covariância entre os valores de cada variável X e o erro.
- Ausência de colinearidade ou multicolinearidades exata entre as variáveis X.

#### **2.6.5.1. Seleção das variáveis**

Num modelo de regressão linear múltipla, a decisão crucial está em selecionar o menor número de variáveis para a maior percentagem de variância explicada. Geralmente,

começa-se com a análise da matriz de correlações, com base na qual, segundo Pyndick e Rubinfeld (2005) duas metodologias podem ser adotadas.

**Método backward (regressivo):** fazer um modelo com todas as variáveis como independentes em relação à variável dependente que se pretende calcular e ir excluindo as variáveis cujos coeficientes não sejam significativamente diferentes de zero ou que menos alterem a variância explicada

**Método forward (progressivo):** fazer um modelo com a variável independente que tiver maior correlação com a variável dependente que se pretende calcular e ir acrescentando as variáveis cujos coeficientes de correlação sejam sucessivamente mais baixos; podem existir problemas de multicolineariedade (duas ou mais variáveis que expliquem o mesmo) e em que apenas uma deve ser mantida.

### 2.6.5.2 Regressão Linear Múltipla

Regressão Linear Múltipla é o estudo do modelo de regressão com mais de uma variável independente, visando uma melhor compreensão do comportamento da variável dependente. O objetivo pode ser explicativo (demonstrar uma relação matemática que pode indicar, mas não prova, uma relação de causa-efeito) ou preditivo (obter uma relação que nos permita, perante futuras observações das variáveis independentes, prever o correspondente valor da variável dependente, sem necessidade de o medir) (Matos, 2005). Vale ressaltar que o ideal é que se tenha o mais alto relacionamento explanatório com o mínimo de variáveis independentes possíveis, sobretudo em virtude do tempo e custos envolvidos na obtenção de dados para muitas variáveis.

Supondo que a variável Y dependa dos valores assumidos por k variáveis independentes ( $X_1, X_2, X_3, \dots, X_k$ ) e que essa dependência seja expressa pelo modelo:

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + E_i \quad (2.1)$$

Onde  $\hat{Y} = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki}$  é a componente funcional, ou seja, a equação que melhor se ajusta aos dados utilizados e  $E_i$  é chamada variável aleatória ou erro, que representa as variações decorrentes das medidas que não puderam ser captadas pela equação aproximada obtida, bem como as influências de outras variáveis que não foram consideradas no modelo.

O coeficiente  $\beta_i$  representa a variação esperada de  $Y$  para cada unidade de variação da variável dependente  $X_i$ , considerando as outras variáveis independentes fixas. O coeficiente  $\alpha$  é chamado intercepto e representa o valor assumido pela variável dependente ( $Y$ ) quando todas as demais forem iguais a zero.

### 2.6.5.3 Estimação dos Parâmetros: Método dos Mínimos Quadrados.

De acordo com o método dos mínimos quadrados, a equação que melhor se ajusta ao modelo é aquela cuja soma dos quadrados dos erros ( $R^2$ ) seja mínima. O  $R^2$  é conhecido como coeficiente de correlação múltipla ao quadrado ou coeficiente de determinação e mede quanto da variável dependente é explicado pelas variáveis independentes da equação, indicando a qualidade do ajuste.

Este coeficiente é obtido dividindo-se a variação explicada ( $Y$  estimado –  $Y$  médio) pela variação total do modelo ( $Y$  medido –  $Y$  médio), ou seja:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad 0 < R^2 < 1 \quad (2.2)$$

Quando o ajuste é bom o modelo explica boa parte da variação total, ou seja, a diferença entre o  $Y$  estimado e a média é praticamente igual à diferença entre o  $Y$  medido e o  $Y$  médio e conseqüentemente o valor de  $R^2$  é próximo de 1. Segundo Baptistella (2005) Coeficientes de determinação com valor acima de 0,75 são considerados bons ajustes.

A desvantagem deste coeficiente é que para uma mesma amostra ele sempre cresce na medida em que aumentam o número de variáveis independentes incluídas no modelo. Assim, em casos de regressões múltiplas, o  $R^2$  não ajustado tende a ser muito “otimista”, não refletindo bem a realidade que se busca. Para corrigir esta deficiência é preferível utilizar o Coeficiente de Determinação Ajustado, onde para um modelo com  $k$  variáveis independentes, ajustado a uma amostra de  $n$  elementos,  $R^2$  ajustado é calculado através da seguinte expressão, onde  $n$  é o número de amostras e  $k$  o número de variáveis independentes:

$$R_{aj}^2 = 1 - \left[ (1 - R^2) \frac{n - 1}{n - k - 1} \right] \quad (2.3)$$

O  $R^2$  ajustado elimina o incentivo para que os pesquisadores incluam muitas variáveis simplesmente para aumentar o valor do coeficiente de determinação.

No contexto da regressão  $R^2$  é uma medida mais significativa do que  $r$  porque o primeiro nos diz a proporção da variação na variável dependente explicada por uma ou mais variáveis explicativas, portanto, fornece uma medida global do grau com que a variação em uma variável determina a variação em outra (Gujarati, 2000).

Através da técnica de regressão é sempre possível encontrar uma equação que ajuste os dados encontrados para as variáveis dependentes e independentes e se o único objetivo for a determinação dessa equação, o método dos mínimos quadrados será suficiente. Entretanto, para que seja possível a inferência dos valores dos parâmetros variando-se alguns dos dados amostrais é preciso supor que os erros sigam alguma distribuição de probabilidade avaliando a equação gerada com base em técnicas de análise estatística.

#### **2.6.5.4 Testes Estatísticos: Estatística-t**

Em geral assume-se que os parâmetros estimados estão normalmente distribuídos. A distribuição normal tem a propriedade de que a área correspondente a 1,96 desvio-padrão, a partir do seu ponto médio, é igual a 95% da área total.

Se um intervalo de confiança de 95% contém o número zero, então, o verdadeiro coeficiente para um parâmetro X pode ser zero. Esse resultado sugere que a correspondente variável dependente pode realmente não ter nenhuma influência sobre a variável dependente. Pode-se testar a hipótese de que o verdadeiro parâmetro na realidade é zero fazendo uma verificação estatística-t definida como:

$$X - 1,96*(\text{Erro padrão de } X) > 0 \quad (2.4)$$

$$t = \frac{X}{\text{Erro padrão de } X} > 1,96$$

Caso a estatística-t seja menor que 1,96 em magnitude, para um intervalo de confiança de 95%, não se pode rejeitar a hipótese de que o parâmetro X seja igual a zero. Por isso, diz-se que nossa estimativa não é estatisticamente significativa.

#### **2.6.5.5 Testes Estatísticos: Significância**

A significância de um resultado é uma medida estimada do grau em que este resultado é "verdadeiro", ou seja, que represente realmente o que ocorre na população. Quanto mais alto o nível-p, menos confiável é a relação observada entre as variáveis na amostra, constituindo assim um indicador da relação entre as respectivas variáveis na população.

Especificamente, o nível-p representa a probabilidade de erro envolvida em aceitar o resultado observado como válido, isto é, como "representativo da população". Por exemplo, um nível-p de 0,05 indica que há 5% de probabilidade de que a relação entre as variáveis encontrada na amostra não seja bem sucedidas. Isto significa que a probabilidade do teste rejeitar uma hipótese que fosse verdadeira (erro tipo I) é inferior a 0,05, mas não diz nada sobre o erro complementar (erro tipo II), ou seja, não rejeitar a hipótese formulada, sendo esta falsa. Os resultados positivos dos testes devem ser, portanto, utilizados com prudência, a menos que se possua uma estimativa da probabilidade do erro do tipo II. Em muitas áreas de pesquisa, o nível-p de 0,05 é costumeiramente tratado como um "limite aceitável" de erro.

### 2.6.5.6 Testes Estatísticos: Teste “d” de Durbin-Watson

O teste de Durbin-Watson é usado para detecção de correlação serial e se baseia na razão entre a soma das diferenças ao quadrado nos sucessivos resíduos e soma dos quadrados dos resíduos. O valor de d é calculado pela Equação 2.5 onde u é o erro.

$$\frac{\sum_{t=2}^{t=n} (u_t - u_{t-1})^2}{\sum_{t=2}^{t=n} u_t^2} \quad (2.5)$$

Segundo Gujarati (2000), as hipóteses que fundamentam a estatística d são: (i) o modelo de regressão inclui um termo de intercepto; (ii) as variáveis explicativas são não-estocásticas; (iii) o modelo de regressão não é auto-regressivo, ou seja, não inclui valores defasados da variável dependente com uma das variáveis explicativas; e (iv) não há observação que estejam faltando nos dados temporais.

Segundo o método, os limites de d são 0 e 4. Para d igual a 2 pode-se dizer que não há correlação serial. Valores muito pequenos de d indicam que os erros sucessivos estão muito próximos, ou positivamente correlacionados. Valores de d mais próximos de 4 indicam que os erros sucessivos são, em média, muito diferentes entre si ou negativamente correlacionados o que poderia indicar que o nível de significância está subestimado. Como uma regra geral, valores de d inferiores a 1 devem ser considerados como alarmantes.

O teste apresenta um limite inferior ( $d_i$ ) e superior ( $d_s$ ) e maneira que se o d calculado estiver desse intervalo existem fortes indícios da existência de correlação serial positiva ou negativa. Os limites  $d_i$  e  $d_s$  são obtidos com base apenas no número de amostras e de variáveis explicativas (n). Para n variando de 6 a 200 e até 20 variáveis explicativas foram tabulados por Durbin-Watson.

### 3. Materiais e Métodos

O objetivo do presente estudo é avaliar a influência das características físicas, químicas e mineralógicas no comportamento mecânico dos solos por meio de análises estatísticas e geotécnicas.

Para tanto, serão tomados como base, os resultados obtidos por autores que estudaram os solos do Distrito Federal, principalmente Cardoso (2002) e Delgado (2007). Cardoso (2002) avaliou treze solos na condição indeformada, caracterizando seus aspectos químicos, mineralógicos, microestruturais e suas propriedades físicas para as amostras naturais, além de avaliar e considerar seu processo de formação.

Delgado (2007), a partir de onze tipos de solo estudados por Cardoso (2002) e dois analisados por Rezende (2003), realiza ensaios complementares para a análise das propriedades mecânicas dos solos compactados, utilizando ensaios de mini-compactação, determinação da sucção pelo método do papel filtro, mini-CBR, compressão simples, absorção, perda de massa por imersão e microscopia de varredura. Em resumo, para cada uma das treze amostras selecionadas por Delgado (2007) são apresentados resultados de:

- **Caracterização física dos solos:** umidade natural ( $w_0$ ), densidade dos grãos ( $G$ ), peso específico natural ( $\gamma_0$ ), peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), índice de vazios ( $e$ ), porosidade ( $n$ ), grau de saturação ( $S_r$ ), limite de liquidez ( $w_L$ ), limite de plasticidade ( $w_P$ ), índice de plasticidade ( $IP$ ), índice de atividade de Skempton ( $I_a$ ) e granulometria.
- **Caracterização química dos solos:** pH, percentual de matéria orgânica, capacidade de trocas catiônicas, extração química total e extração química das fases minerais.
- **Identificação e quantificação mineralógica:** Cardoso (2002) utilizou a metodologia desenvolvida por Martins (2000), que adota a união de várias técnicas instrumentais tais como: difratometria de raios-X, Tabela de Munsell, análises térmicas e micromorfológicas,



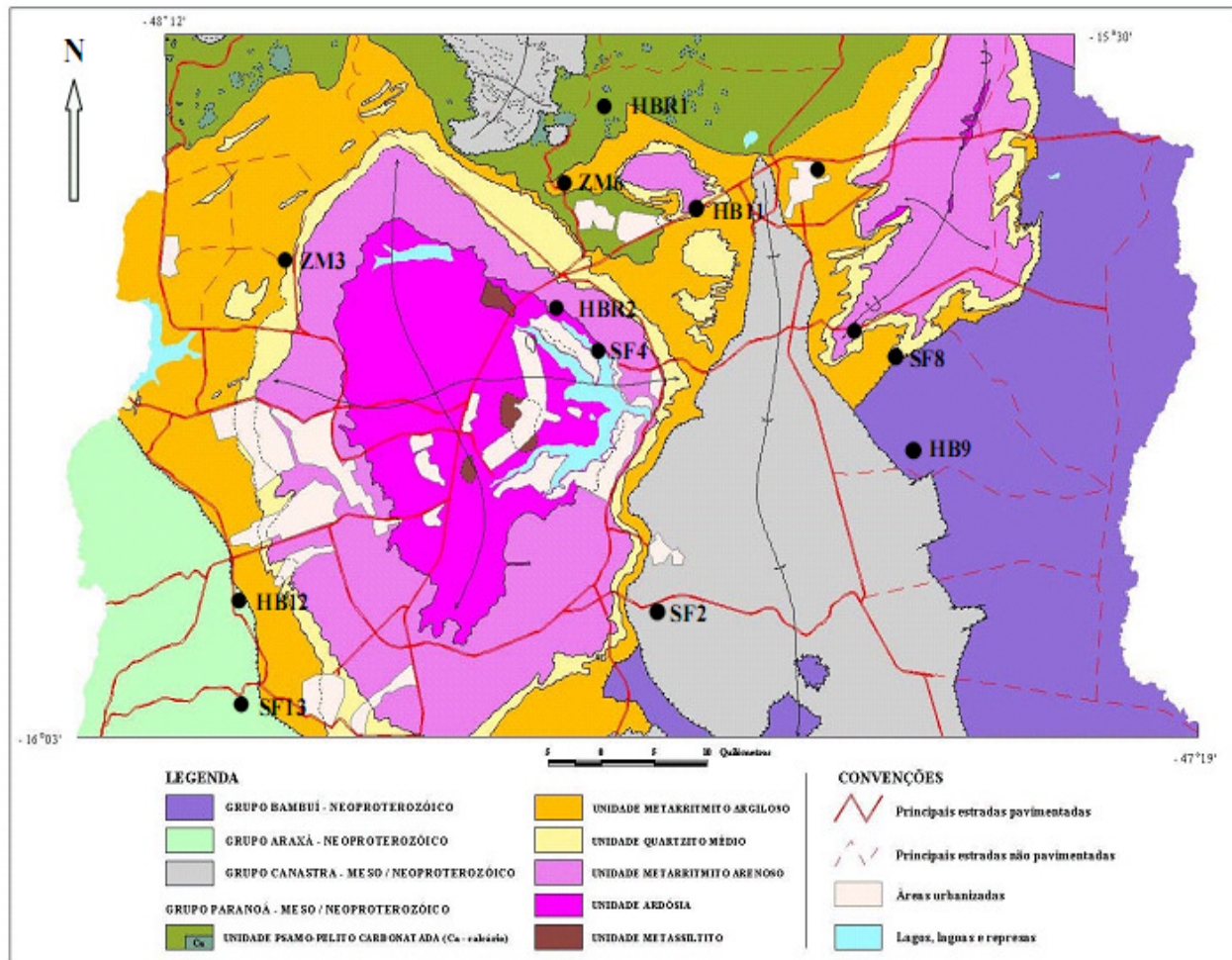
além da análise química total para a caracterização. Apenas para as duas amostras trabalhadas por Rezende (2003), não foram feitos estes ensaios.

A nomenclatura estabelecida por Delgado (2007) foi mantida, utilizando-se HB para os solos do horizonte B estudados por Cardoso (2002) e HBR para os solos deste horizonte estudados por Rezende, ZM para a Zona Mosqueada e SF para o Saprólito Fino, seguidos por números arábicos crescentes de acordo com a data de identificação do horizonte em campo.

### ***3.1 Solos a serem analisados no estudo***

Cardoso (2002) selecionou treze pontos de amostragem escolhidos propositalmente para representar os diferentes tipos de solo existentes no Distrito Federal. Segundo o autor, o objetivo principal da escolha foi o de analisar os principais horizontes de solo do Distrito Federal e ter uma grande diversidade de propriedades químicas, mineralógicas, físicas e estruturais.

A seleção baseou-se na organização dos elementos naturais da paisagem, levando em consideração a geologia, a distribuição dos solos e a compartimentação geomorfológica. A existência de cortes desenvolvidos por obras de engenharia nos diversos contextos geológicos, pedológicos e geomorfológicos também foram fundamentais na escolha dos perfis. A Figura 3.1 apresenta a distribuição dos materiais na região do DF.



**Figura 3.1: Mapa geológico do Distrito Federal e pontos selecionados para coleta (Delgado (2007))**

### 3.2 Análises Estatísticas

Neste trabalho, espera-se que, com base nas análises geotécnicas e estatísticas dos dados obtidos por Cardoso (2002) e Delgado (2007) e por meio do uso de regressões, seja possível obter uma estimativa dos parâmetros geotécnicos partindo do conhecimento do valor de outras variáveis que, preferencialmente, apresentem maior facilidade de medida.

Com base nas evidências encontradas por diversos autores, pode-se afirmar que os parâmetros geotécnicos dos solos guardam estreita relação com suas propriedades físicas e composição química. O objetivo geral deste estudo é, a partir desta constatação, tentar

explicar os comportamentos identificados buscando identificar quais as variáveis e parâmetros mais relevantes para se avaliar de maneira qualitativa e quantitativa tais relações, por meio do uso de ferramentas estatísticas.

De forma geral, os dados existentes podem ser divididos em três grupos: (1) caracterização química e mineralógica, (2) caracterização física e (3) parâmetros geotécnicos que caracterizam o comportamento geomecânico dos solos. A Figura 3.2 apresenta de forma esquemática esta divisão.

Composição Química e Mineralógicas dos Solos	Propriedades Físicas dos Solos	Propriedades Geotécnicas dos Solos
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Composição química</li> <li>2. Capacidade de troca catiônica</li> <li>3. pH</li> <li>4. Teor de matéria orgânica</li> <li>5. Composição mineralógica</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limites de Atterberg</li> <li>2. Granulometria</li> <li>3. Índices físicos (Índice de vazios, porosidade, grau de saturação, densidade dos grãos)</li> <li>4. Índice de atividade de Skempton</li> <li>5. Estrutura (agregada, não agregada, dispersa, floculada)</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito)</li> <li>2. Perda de massa por imersão</li> <li>3. Sucção matricial</li> <li>4. Expansão e contração</li> <li>5. Compactação</li> <li>6. Condutividade hidráulica</li> <li>7. Comportamento anisotrópico e isotrópico</li> </ol>

**Figura 3.2: Parâmetros Químicos/Mineralógicos, Físicos e Geotécnicos**

Entende-se que a estrutura química/mineralógica influencia diretamente as propriedades físicas dos solos que, por sua vez, influenciam os parâmetros geotécnicos. Assim, ainda que indiretamente, as propriedades químicas acabam por influenciar as propriedades geotécnicas. Análises estatísticas podem ser feitas correlacionando as propriedades químicas e geotécnicas, mas espera-se que os parâmetros e índices obtidos nessas análises sejam menos significativos do que aqueles que relacionam as propriedades químico-físicas e físico-geotécnicas já que, neste caso, é provável que vários fatores colaborem para a definição de cada uma das propriedades.

Para a realização destas análises foi utilizado o programa de econometria e estatística *EViews 6* e o *Excel*.

## 4. Caracterização dos Solos Estudados

De forma a bem caracterizar o material utilizado, foram feitas análises mineralógicas, químicas, físicas e estruturais dos solos quando em estado natural, compactado e estabilizado. Tais análises vêm contribuir para uma melhor compreensão dos aspectos que influenciam no comportamento dos solos.

Conforme anteriormente mencionado, os solos estudados no presente trabalho já foram objeto de estudo por Cardoso (2002) e Delgado (2007). Os valores aqui apresentados correspondem aos resultados obtidos pelos referidos autores. Ressalta-se, porém, que devido à possibilidade de diferenças nos pontos de coleta, diferenças oriundas da repetibilidade dos ensaios e ou metodológicas, podem ser registradas pequenas variações entre os valores determinados por cada autor.

### 4.1 Propriedades físicas

Serão aqui apresentados os resultados referentes à caracterização física dos solos estudados obtidos por Cardoso (2002) e Delgado (2007). Os valores obtidos são sumarizados na Tabela 4.1, que apresenta os resultados para os seguintes parâmetros: umidade natural ( $w_n$ ), densidade dos grãos (G), peso específico natural ( $\gamma_0$ ), peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), índice de vazios (e), porosidade (n), grau saturação (Sr), limite de liquidez ( $w_L$ ), limite de plasticidade ( $w_P$ ), índice de plasticidade (IP) e índice de atividade de Skempton (Ia).

A repetição da caracterização destes solos realizada por Delgado (2007) teve por objetivo averiguar a similaridade das amostras, uma vez que elas foram retiradas em épocas distintas e, em alguns casos, não exatamente nos mesmos pontos e/ou cotas. Verificou-se, a similaridade entre os resultados obtidos em 2002 e 2007, registrando-se pequenas diferenças em termos de porosidade.

**Tabela 4.1: Caracterização Física dos Solos Estudados (Delgado, 2007 baseado em dados de R- Rezende (2003), C – Cardoso (2002) e D – Delgado,2007)).**

Amostra	wn (%)		G		Y <sub>o</sub> (KN/m <sup>3</sup> )		Y <sub>d</sub> (KN/m <sup>3</sup> )		e		n (%)		Sr (%)		wL		wP		IP		I <sub>a</sub>	
	R/C	D	R/C	D	R/C	D	R/C	D	R/C	D	R/C	D	R/C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
HB7	25,2	25,0	2,8	2,8	12,2	13,2	9,7	10,6	1,9	1,6	64,9	62,0	38,6	43,5	40,0	42,0	32,0	33,0	8,0	9,0	0,2	0,2
HB9	28,1	30,0	2,8	2,8	11,1	10,5	8,7	8,1	2,1	2,3	68,1	70,1	36,5	35,3	48,0	49,0	38,0	39,0	10,0	10,0	0,1	0,2
HB10	11,0	14,3	2,7	2,7	14,1	13,8	12,7	12,1	1,1	1,2	52,4	54,5	27,2	32,3	np	np	np	np	np	np	np	np
HB11	14,1	13,0	2,7	2,7	14,5	14,0	12,7	12,4	1,1	1,1	52,2	53,2	35,0	30,9	np	np	np	np	np	np	np	np
HB12	25,0	22,0	2,8	2,8	17,1	16,2	13,7	13,3	1,0	1,1	50,2	52,0	69,5	57,2	45,0	47,0	30,0	32,0	15,0	15,0	0,5	0,5
HBR1		26,0	2,8	2,8		12,6		10,0		1,7		63,3		41,9	55,6	57,6	36,2	38,6	19,4	19,0	0,6	
HBR2		25,0	2,8	2,8		12,1		9,7		1,8		64,3		38,4	50,1	52,3	38,2	40,9	11,9	11,4	0,3	
ZM3	15,0	18,0	2,7	2,7	20,1	19,3	17,5	16,4	0,5	0,6	40,0	38,1	78,7	78,9	np	np	np	np	np	np	np	np
ZM5	22,8	21,4	2,7	2,7	20,7	21,5	16,9	17,7	0,6	0,6	37,3	37,9		96,1	22,0	23,0	np	np	np	np	np	np
ZM6	11,0	13,0	2,9	2,9	14,6	14,2	13,2	12,6	1,1	1,2	52,9	55,0	27,9	30,3	38,0	39,0	21,0	22,0	17,0	17,0	2,0	2,3
SF1	15,0	18,6	2,9	2,9	17,5	18,0	15,2	15,2	0,9	0,9	46,1	46,1	50,5	62,5	43,0	45,0	25,0	26,0	18,0	19,0	1,3	1,4
SF2	1,2	8,5	2,8	2,8	18,7	19,5	18,5	18,0	0,5	0,5	32,9	34,6	6,9	45,1	42,0	40,0	20,0	18,0	22,0	22,0	2,7	2,4
SF4	23,0	25,0	2,8	2,8	20,5	19,3	16,7	15,4	0,7	0,8	39,5	44,0	98,9	89,5	36,0	35,0	21,0	20,0	15,0	15,0	0,7	0,8
SF8	2,1	5,8	2,7	2,7	16,7	17,6	16,4	16,6	0,6	0,6	38,0	37,3	9,2	26,3	np	np	np	np	np	np	np	np
SF13	10,1	11,0	2,8	2,8	20,1	19,6	18,3	17,6	0,5	0,6	33,3	35,9	56,5	55,1	np	np	np	np	np	np	np	np

Delgado (2007) ressalta que, similarmente ao definido por Cardoso (2002), o índice de vazios (e) e a porosidade (n) são, em média, maiores nos solos definidos como (HB) (“e” entre 1,09 e 2,34) quando comparados aos horizontes (ZM) (“e” entre 0,52 e 1,22) e (SF) (“e” entre 0,53 e 0,85). Já os valores de peso específico se comportam de forma inversa ao “e”, apresentando, em média, valores menores para os solos HB em relação aos demais. Cardoso (1995) e Araki (1997), explicam que em função do elevado teor de  $Al^{+3}$  e  $Fe^{+3}$  que ocorre com o aumento do grau de intemperismo, o peso específico pode aumentar em solos mais intemperizados.

Delgado (2007) observa ainda que os limites de liquidez e plasticidade dos solos (HB) são sempre superiores aos encontrados nos solos (ZM) e solos (SF). Os índices de plasticidade (IP), em contraposição, fornecem resultados onde os valores obtidos são, em média, menores para os (HB) e, maiores para os (ZM) e (SF).

Na Tabela 4.2 é mostrada a análise granulométrica efetuada por Delgado (2007) com e sem o uso do defloculante hexametáfosfato de sódio, cuja utilização visa desagregar os torrões e agregações de baixa estabilidade diante do agente químico.

**Tabela 4.2: Análise Granulométrica das Amostras de Solos em Estado Natural (Delgado, 2007)**

Amostra	Análise Granulométrica ABNT NBR 7181/84 Sem defloculante				Análise Granulométrica ABNT NBR 7181/84 Com defloculante			
	Pedregulho	Areia	Silte	Argila	Pedregulho	Areia	Silte	Argila
HB7	0,0	53,0	40,0	7,0	0,0	20,0	33,0	47,0
HB9	0,0	40,5	51,5	8,0	0,0	11,4	15,0	73,6
HB10	0,0	65,3	22,3	12,4	0,0	71,0	7,0	22,0
HB11	0,0	76,5	17,0	6,5	0,0	67,4	7,8	24,8
HB12	0,0	12,8	58,2	29,0	0,0	13,7	54,2	32,1
HBR1	0,2	4,0	74,0	22,0	0,1	5,6	60,4	34,0
HBR2	0,0	6,6	67,8	25,6	0,0	7,1	55,1	37,8
ZM3	0,0	85,0	7,0	8,0	0,0	93,0	0,8	6,2
ZM5	0,0	44,3	47,4	8,3	0,0	50,0	37,0	13,0
ZM6	0,0	5,0	89,0	6,0	0,0	11,0	80,3	8,7
SF1	0,0	7,6	85,2	7,2	0,0	12,8	73,6	13,6
SF2	0,0	11,5	76,0	12,5	0,0	13,8	77,9	8,3
SF4	0,0	12,0	81,0	7,0	0,0	27,2	52,5	20,3
SF8	0,0	85,5	6,5	8,0	0,0	91,3	2,6	6,1
SF13	0,0	13,8	78,1	8,1	0,0	14,6	80,0	5,4

## **4.2 Propriedades Químicas e Mineralógicas**

Para análise da composição química dos solos estudados foram avaliados os seguintes parâmetros: pH, percentual de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, extração química total e extração química das fases minerais.

### **4.2.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)**

O pH representa um fator importante na formação de agregados e, conseqüentemente, influencia o arranjo estrutural entre os sólidos do solo e define a distribuição dos vazios (Delgado, 2007).

Conforme já discutido no capítulo 2, as soluções de alteração que ocorrem nos meios tropicais são caracterizadas por altas concentrações de  $\text{CO}_2$  provenientes da degradação da matéria orgânica. O  $\text{CO}_2$  encontra-se dissolvido na água como  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{H}^+$ , gerando características levemente ácidas com pH variando entre 5,5 e 6,0. A acidez dos solos tropicais se deve também à remoção de bases (K, Na, Ca, Mg) por arrastamento nas águas de infiltração. Tais afirmações corroboram os valores de pH obtidos tanto por Cardoso (2002) quanto por Delgado (2007), sendo que em alguns casos os pH foram ainda menores, variando na quase totalidade entre 4,5 e 5,5.

O método utilizado pelos autores para definição do pH foi o potenciométrico, cujo aparelho medidor possui um eletrodo de vidro com um fio de platina em seu interior, cheio de solução chamada solução extratora e um outro eletrodo chamado de referência, que é colocado em contato com a solução do solo, criando um potencial através da membrana de vidro. A medida desse potencial indica a concentração de hidrogênio ativo da solução, em valores de pH. O ensaio foi realizado com o uso de dois líquidos extratores: água destilada e KCl 1,0 N.

A diferença entre o pH em KCl 1N e em água destilada é conhecida como  $\Delta\text{pH}$ , podendo ser negativa ou positiva. O  $\Delta\text{pH}$  positivo aponta para a predominância dos oxihidróxidos de ferro e alumínio no solo enquanto que resultados negativos indicam a predominância de argilo-minerais.

A Tabela 4.3 mostra os resultados de pH obtidos para os solos estudados. A diferença entre os dois resultados de pH ( $\Delta\text{pH}$ ) mostra-se negativa para todas as amostras, excetuando-se HB11, significando que nestas amostras ocorre predomínio de argilo-minerais. O valor positivo de  $\Delta\text{pH}$  para HB11 demonstra ser este o único solo estudado onde predomina os oxi-hidróxidos de Fe e Al sobre os minerais de argila, o que está de acordo com a composição mineralógica.

**Tabela 4.3: Resultados de pH obtidos para os solos estudados (Delgado, 2007).**

Amostra	pH KCl		pH H <sub>2</sub> O		$\Delta\text{pH}$	
	2002	2007	2002	2007	2002	2007
HB7	4,90	4,90	5,50	5,60	-0,60	-0,70
HB9	5,10	5,00	5,50	5,50	-0,40	-0,50
HB10	4,11	4,05	4,60	4,50	-0,49	-0,45
HB11	5,40	5,50	5,20	5,30	0,20	0,20
HB12	4,80	4,75	6,10	6,10	-1,30	-1,35
HBR1	4,20	4,20	5,10	5,10	-0,90	-0,90
HBR2	5,00	5,00	5,20	5,20	-0,20	-0,20
ZM3	5,02	5,00	5,10	5,10	-0,08	-0,10
ZM5	4,49	4,45	4,90	4,80	-0,41	-0,35
ZM6	4,20	4,10	5,10	5,00	-0,90	-0,90
SF1	4,10	4,15	4,70	4,70	-0,60	-0,55
SF2	4,09	4,11	4,80	4,80	-0,71	0,69
SF4	4,05	4,05	4,70	4,70	-0,65	-0,65
SF8	4,45	4,40	4,80	4,70	-0,35	-0,30
SF13	4,15	4,20	4,70	4,70	-0,35	-0,50

Botelho da Costa em Delgado (2007) destacam que além do processo de endurecimento e cimentação que ocorre nos solos tropicais, a agregação em solos lateríticos decorre também da ação floculante (irreversível ou não) dos hidróxidos de ferro ou alumínio. Neste tipo de solo, a lixiviação geralmente provoca a liberação de  $\text{Al}^{3+}$  da malha cristalina que passa a ocupar posições de troca. A floculação por ácidos é facilitada pela redução da carga negativa resultante da influencia do pH reduzido.



#### 4.2.2 Determinação do Teor de Matéria Orgânica (MO)

A determinação dos percentuais de matéria orgânica foi feita por Cardoso (2002) por meio da oxidação da matéria orgânica, realizada em via úmida, com dicromato de potássio em meio sulfúrico. Por meio deste ensaio, calcula-se a quantidade de carbono orgânico da solução e, considerando que na composição do húmus o carbono participa, em média, com 58% da massa, é possível calcular o percentual de matéria orgânica no solo por meio da seguinte equação:

$$\text{Matéria Orgânica (\%)} = [\text{C(g/Kg)} \times 1,724] / 100 \quad (4.1)$$

As concentrações de matéria orgânica nos solos são consideradas baixas, sendo os teores mais elevados os dos solos HB10, HB12 e HBR2. De acordo com Cardoso (2002), a matéria orgânica pode influenciar alguns parâmetros físicos do solo, como G, grau de agregação e limites de Atterberg, embora para os solos estudados, devido ao baixo teor de MO, estas alterações não sejam significativas.

#### 4.2.3 Capacidade de Troca Catiônica (CTC)

A CTC do solo é definida como sendo a soma total dos cátions que o solo pode reter na superfície coloidal. Estes cátions adsorvidos podem ser removidos por soluções salinas de amônio, cálcio, bário e soluções de ácidos diluídos e, posteriormente, determinados por métodos volumétricos de emissão ou absorção atômica. A CTC pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\text{CTC}(\text{cmol}_c/\text{kg}) = (\text{S} + \text{acidez}); \quad (4.2)$$

onde  $\text{S} (\text{cmol}_c/\text{kg}) = (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)$  e  $\text{Acidez} (\text{cmol}_c/\text{kg}) = (\text{H}^+ + \text{Al}^{+++})$

A Tabela 5.4 apresenta as concentrações obtidas pelos autores para os solos estudados. Pode-se considerar que os solos estudados são todos de baixa CTC ( $< 4,62 \text{ cmol}_c/\text{kg}$ ), excetuando-se HB12, HBR1 e HBR2 que são definidos como de média CTC (de 4,62 a 11,30  $\text{cmol}_c/\text{kg}$ ).

#### 4.2.4 Extração Química Total

As presenças dos elementos Si, Al, Fe, Ti, Ca, Mg e K foram determinadas por meio de solução de ataque e posterior Espectrometria de Emissão Atômica com Plasma de Acoplamento Induzido (ICP/AES), realizadas por Cardoso (2002). Segundo o autor, as concentrações de K, Mg e Ca não são muito confiáveis, devido a uma concentração muito baixa destes elementos nos solos estudados. A Tabela 4.4 apresenta a análise química total dos solos estudados, realizada por Cardoso (2002) e por Delgado (2007).

**Tabela 4.4: Propriedades Químicas dos Solos Estudados (Delgado, 2007).**

Amostra	Ca Mg		K		Na		Al		H Al		Al		CTC		MO	
	cmol <sub>c</sub> /kg		cmol <sub>c</sub> /kg		cmol <sub>c</sub> /kg		cmol <sub>c</sub> /kg		cmol <sub>c</sub> /kg		%		cmol <sub>c</sub> /kg		%	
	2002	2007	2002	2007	2002	2007	2002	2007	2002	2007	2002	2007	2002	2007	2002	2007
HB7	0,08	0,07	0,01	0,03	ND	ND	0,55	0,60	0,70	0,81	28,67	25,00	0,79	0,81	0,50	0,45
HB9	0,01	0,03	0,02	0,04	ND	ND	0,23	0,30	1,10	1,20	39,34	40,00	1,13	1,27	0,50	0,35
HB10	0,21	0,24	0,03	0,03	ND	ND	0,24	0,16	1,96	1,92	9,92	11,00	2,20	2,19	0,71	0,70
HB11	0,18	0,17	0,01	0,02	ND	ND	0,60	0,52	1,46	1,51	12,81	15,00	1,65	1,70	0,50	0,55
HB12	0,38	0,40	0,12	0,11	ND	ND	1,22	1,10	5,56	5,50	17,83	25,00	6,06	6,01	0,65	0,67
HBR1	2,20	2,10	0,11	0,11	0,04	ND	1,00	0,90	5,00	5,00	30,00	29,00	7,35	7,21	5,20	0,51
HBR2	0,60	0,80	0,03	0,02	0,10	ND	0,10	0,10	4,60	4,80	12,00	15,00	5,33	5,62	8,60	0,88
ZM3	0,19	0,21	0,01	0,02	ND	ND	0,01	0,01	0,40	0,60	3,66	6,00	0,60	0,83	0,15	0,20
ZM5	0,23	0,25	0,01	0,01	ND	ND	0,11	0,10	1,76	1,78	17,41	20,00	2,00	2,04	0,15	0,20
ZM6	0,19	0,20	0,01	0,01	ND	ND	0,03	0,03	0,66	0,61	21,52	25,00	0,86	0,82	0,05	0,04
SF1	0,24	0,25	0,03	0,03	ND	ND	0,08	0,03	1,92	1,90	17,84	18,00	2,19	2,18	0,15	0,18
SF2	0,28	0,29	0,02	0,02	ND	ND	0,08	0,05	1,04	1,08	16,57	15,00	1,34	1,39	0,05	0,05
SF4	0,23	0,22	0,01	0,02	ND	ND	0,04	0,02	1,26	1,28	18,75	19,00	1,50	1,52	0,20	0,20
SF8	0,12	0,13	0,10	0,10	ND	ND	0,36	0,40	2,78	2,81	3,78	6,00	3,00	304,00	0,07	0,08
SF13	0,24	0,25	0,02	0,03	ND	ND	0,02	0,01	0,58	0,61	17,06	15,00	0,84	0,89	0,23	0,25

#### 4.2.5 Extração química das fases minerais

Os procedimentos de extração seletiva e sequencial das fases presentes em solos e sedimentos visam, principalmente, a compreensão de sua gênese e dos processos de mobilidade e retenção de elementos químicos nesses materiais, além de fornecer subsídios para um melhor entendimento das características físicas dos solos, tais como a plasticidade, a resistência ao cisalhamento, densidade real dos grãos, o poder de agregação e características secundárias (Tabela 4.5).

Segundo Cardoso (2002) a utilização de extração seqüencial nos solos lateríticos é de extrema importância para estudos das fases que compõem os oxi-hidróxidos de baixa cristalinidade e oxi-hidróxidos cristalinos como goethita e hematita.

Os valores da relação sílica-sesquióxidos (Kr) apresentados na última coluna da Tabela 4.5 são os calculados sem o percentual de quartzo. A norma DER-SP (1971) especifica que o solo laterítico é o material cuja fração coloidal (abaixo de 2 micra) apresenta relação molecular sílica/sesquióxidos menor que 2 e a presença apreciável de sesquióxido de ferro, tendência para o concrecionamento e endurecimento sob exposição ao sol, baixa expansibilidade e baixo teor de matéria orgânica. Assim, Os valores de Kr inferiores a 2 indicam que todos os solos estudados são lateríticos. Delgado (2007) destaca que, de acordo com a separação nos três grupos de solos (latossolo, zona mosqueada e saprólito), a relação sílica-sesquióxidos não está coincidindo com o esperado já que, de acordo com a classificação MCT, os solos HB9b, SF13 e SF4 são não lateríticos e, os HB12 e SF8 estão localizados na linha entre o LG'/NG', podendo apresentar comportamento laterítico ou não laterítico. Por outro lado, considerando-se a inclusão do quartzo, grande parte dos solos teriam Kr superior a 2,0 o que os classifica como não lateríticos, persistindo o problema classificatório quanto a nomenclatura adotada (HB, ZM e SF).

**Tabela 4.5: Análise Química Total e Cálculo da Relação Sílica-Sesquióxidos (Cardoso, 2002 modificado por Delgado, 2007)**

Amostra	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	K <sub>2</sub> O %	MgO %	SiO <sub>2</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	PF %	Soma %	Kr %	Quartzo %	SiO <sub>2</sub> %	Kr %
HB7	29,60	0,04	13,13	0,20	0,06	37,98	1,68	17,18	99,87	0,89	22,30	29,51	0,69
HB9b	39,99	0,02	12,14	0,14	0,04	25,71	2,17	19,99	100,20	0,49	3,70	24,76	0,47
HB10	10,37	0,06	3,80	0,19	0,00	78,18	0,51	6,13	99,24	5,52	69,20	24,08	1,70
HB11	13,68	0,10	6,81	0,07	0,00	67,65	0,85	9,88	99,03	3,30	63,40	24,67	1,21
HB12	19,59	0,10	8,61	4,05	0,88	57,10	0,83	7,93	99,09	2,02	33,60	37,91	1,34
ZM3	3,69	0,08	1,73	0,55	0,00	92,61	0,14	1,48	100,27	17,09	88,60	10,56	1,95
ZM5	17,60	0,07	5,73	4,01	0,24	66,70	0,84	3,85	99,04	2,86	54,20	30,55	1,31
ZM6	21,62	0,04	13,03	1,57	0,26	53,94	0,88	3,29	99,63	1,56	30,30	37,60	1,09
SF1	18,05	0,03	8,46	3,76	0,58	62,83	0,66	4,85	99,22	2,37	35,30	40,65	1,53
SF2	19,76	0,11	6,75	3,28	0,60	67,25	0,81	4,36	99,92	2,86	46,20	36,18	1,54
SF4	18,85	0,06	4,71	4,27	0,26	64,97	0,88	4,95	98,95	2,76	32,10	44,11	1,87
SF8	4,40	0,08	3,88	0,09	0,00	86,86	0,35	2,82	98,48	10,49	81,70	15,90	1,92
SF13	17,21	0,11	5,62	4,31	0,53	67,19	0,65	3,50	99,12	2,94	45,10	36,39	1,62

A perda ao fogo (PF) ocorre pela evaporação da água das hidroxilas dos argilo-minerais e hidróxidos presentes no solo tais como  $\text{Al(OH)}_3$  e  $\text{Fe(OH)}_3$  e uma parcela pela perda de componentes voláteis de matéria orgânica, sulfeto, sulfato e carbonatos (Strecker *et al*, 2007). Nos ensaios realizados por Cardoso (2002) a PF foi determinada pela diferença entre a perda total de massa até 1200°C e a perda devido a umidade, até 150 °C e corresponde ao percentual da massa total.

#### 4.2.6 Composição mineralógica

A análise mineralógica realizada por Cardoso (2002) teve por objetivo identificar e quantificar os minerais dos materiais estudados, de forma bastante precisa, para a realização de correlações com os aspectos físicos, químicos e micromorfológicos destes solos. Para tanto, o autor utilizou uma adaptação da metodologia desenvolvida por Martins (2000), onde se utiliza uma união de várias técnicas instrumentais de identificação e quantificação mineralógica (difratometria de raios-X, Tabela de Munsell, análises térmicas e micromofológicas), além da análise química total das amostras. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6: Características Mineralógica dos Solos Estudados (Cardoso,2002 modificado por Delgado, 2007).**

Amostra	Gibbsita	Caulinita	Illita	Goethita	Hematita	Quartzo	Rutilo+ Anastásio	Soma
	%	%	%	%	%	%	%	%
HB7	23,1	31,0	2,4	3,6	10,9	22,3	1,7	95,0
HB9	30,7	45,1	1,9	1,6	11,4	3,7	2,2	96,6
HB10	6,3	16,9	2,2	0,8	3,4	69,2	0,5	99,3
HB11	18,2	9,2	0,0	1,8	5,7	63,4	0,8	99,1
HB12	5,5	26,5	21,9	3,4	6,3	33,6	0,8	98,0
ZM3	1,3	5,1	3,2	0,1	1,6	88,6	0,1	100,0
ZM5	11,1	3,8	12,0	2,9	3,2	54,2	0,8	98,0
ZM6	3,4	46,8	3,7	1,5	11,7	30,3	0,9	98,3
SF1	0,6	34,7	22,2	0,9	7,7	35,3	0,7	102,1
SF2	2,3	26,3	17,1	2,0	5,0	46,2	0,8	99,7
SF4	6,6	24,1	26,8	1,7	3,6	32,1	0,9	95,8
SF8	2,1	11,2	0,0	1,5	3,1	81,7	0,3	99,9
SF13	1,2	18,6	26,3	3,0	3,6	45,1	0,6	98,4

Dentre os principais resultados apresentados pelo autor e sumarizados por Delgado (2007) tem-se:

- A mineralogia dos materiais estudados é típica de solos que sofreram intemperismo químico, cujos processos de alteração predominantes são a alitização e a monossilicização. O primeiro processo é bem marcado nos solos HB, onde os teores de gibbsita são expressivos (entre 5,5 a 30,7%). Nos solos (ZM) e (SF), a gibbsita possui uma importância reduzida (exceto para o solo ZM5) e a caulinita + illita, argilominerais silicatados resultantes da monossilicização, são predominantes. A illita tem presença marcante na composição mineralógica dos solos predominantemente siltosos (SF).
- Segundo Cardoso *et al.* (1998) *apud* Delgado (2007) os oxi-hidróxidos de Al cristalinos e paracristalinos, formados na alitização, são fundamentais no desenvolvimento de agregados de partículas finas e nas fracas ligações interestruturais dos latossolos do DF. A geração destes agregados argilosos influi no aumento da macroporosidade, influenciando assim no comportamento mecânico dos solos. Ainda segundo os autores, os solos do DF apresentam suas características estruturais influenciadas pelo intemperismo químico tendo influência desprezível à origem residual ou transportada do solo.
- Embora não se possa desprezar a presença de agregados, o quartzo forma, praticamente, a quase totalidade da fração areia dos solos estudados, uma vez que não são encontrados outros minerais típicos desta fração em termos relevantes, como feldspatos e carbonatos que, evidentemente, foram solubilizados sob as condições regionais de intemperismo químico.
- De acordo com as análises micromorfológicas, realizadas por Cardoso (2002), a goethita está totalmente dispersa na matriz, não formando nódulos. A hematita, por sua vez, se encontra sob a forma nodular ou dispersa na matriz.
- O  $TiO_2$  dos solos estudados está na forma de rutilo e anatásio, constituindo formas resistentes ao intemperismo. Apesar de estes minerais terem sido estimados em conjunto, o anatásio é dominante em relação ao rutilo, principalmente nos horizontes de solo (HB). No entanto, estes representam apenas traços nos solos estudados.

Tendo por finalidade verificar a atuação do ferro nas propriedades físicas dos solos estudados, Cardoso (2002) realizou a quantificação das possíveis formas em que são encontrados os oxi-hidróxidos de Fe nos solos por eles estudados (Tabela 4.7), a partir da diferença entre  $Fe_2O_3$  da análise química total e o  $Fe_2O_3$  da análise química da fase de oxi-hidróxidos. De forma a verificar o efeito destes oxi-hidróxidos de Fe, o autor procedeu à extração da goethita e parte da hematita, além dos amorfos e paracristalinos, por meio do uso de citrato de sódio e ácido cítrico.

Com a extração foi verificado que tais componentes incrementam a plasticidade, aumentando os limites de Atterberg ( $w_L$  e  $w_p$ ) e diminuindo os índices de plasticidade (IP). Não obstante, o autor ressalta ainda que a variação quanto ao  $w_p$  não é constante, provavelmente porque este pode ser resultante de combinações mais complexas entre as propriedades dos solos.

**Tabela 4.7: Teor de  $Fe_2O_3$  nas Amostras Estudadas (Cardoso,2002 modificado por Delgado, 2007).**

Amostra	$Fe_2O_3$ Disperso (%)	$Fe_2O_3$ Nódulos (%)	$Fe_2O_3$ Total (%)
HB7	4,27	8,87	13,14
HB9b	3,84	8,3	12,14
HB10	1,84	1,96	3,8
HB11	1,94	4,87	6,81
HB12	2,27	6,34	8,61
ZM3	0,44	1,29	1,73
ZM6	1,44	11,59	13,03
SF2	1,78	4,97	6,75
SF4	1,77	2,94	4,71
SF8	3,09	0,79	3,88
SF13	2,03	3,59	5,62

### **4.3 Propriedades Geotécnicas**

Serão aqui apresentados os resultados referentes à caracterização geomecânica dos solos estudados por Cardoso (2002) e Delgado (2007) incluindo os seguintes parâmetros:

- Umidade ótima ( $W_{ot}$ ), Densidade máxima ( $\gamma_{dmax}$ ), e grau de saturação ( $S_r$ ) obtidos pelo ensaio de compactação nas energias Proctor Normal e Proctor Intermediário;
- Perda de massa por imersão (PMI)
- Ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ), obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto;
- Índice de vazios inicial ( $e_0$ ); Pressão de entrada de ar nos macroporos (EAMA); pressão correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos ( $B_0$ ); teor de umidade correspondente ao ponto  $B_0$  ( $w_{B_0}$ ); saturação correspondente ao ponto  $B_0$  ( $S_r_{B_0}$ ); pressão de entrada de ar nos microporos (EAMI); teor de umidade correspondente ao ponto EAMI ( $w_{EAMI}$ ); saturação correspondente ao ponto EAMI ( $S_r_{EAMI}$ ) obtidos pelo ensaio de determinação das curvas características.

### 4.3.1 Curvas de Compactação

Considera-se a estrutura interna do solo, de forma simplificada, tendo em conta os elementos: partículas elementares e agregados de partículas e poros que são preenchidos por ar e/ou água. Quando as partículas elementares estão distribuídas de forma homogênea, considera-se uma estrutura do tipo matricial com grãos de areia rodeados de partículas argilosas elementares criando uma matriz. Quando as partículas elementares estão agrupadas como se fosse um grão de tamanho maior diz-se que a microestrutura é formada por agregados.

A presença ou ausência de agregados no solo tem implicação na distribuição dos poros que caracteriza a sua microestrutura. A presença de agregados comumente implica na presença de macroporos entre eles e microporos em seu interior. Por outro lado, a ausência de agregados implica em microestrutura marcada por poros uniformes ou bem distribuídos geralmente em conformidade com a distribuição granulométrica sendo que, nesses dois últimos casos, a relação da distribuição granulométrica com a distribuição dos poros pode ceder espaço para o arranjo estrutural imposto pelo processo de formação do solo.

A estrutura de um solo deve ser analisada em dois níveis de escala: o microestrutural (associações de partículas dentro do solo) e o macroestrutural (arranjos de

agregados dentro da massa de solo). Ressalta-se que a macroestrutura resultante de amostras preparadas a diferentes condições iniciais de compactação é diferente, apesar de sua mineralogia, textura e método de preparação idêntica. O aspecto mais relevante da estrutura no comportamento de engenharia quase sempre é o macroestrutural.

O processo de compactação é uma técnica que visa à redução do índice de vazios através da expulsão de ar dos poros do solo, alterando assim, o arranjo macroestrutural as partículas ou agregados de partículas. Segundo Delgado (2007) a compactação gera nos solos deformações permanentes que modificam suas propriedades originais causando entre outros, os seguintes efeitos: densificação do solo, aumento da resistência ao cisalhamento, redução da compressibilidade, redução da condutividade hidráulica, redução da erodibilidade, além de alterar a estrutura do solo e modificar a anisotropia de suas propriedades hidráulicas e mecânicas.

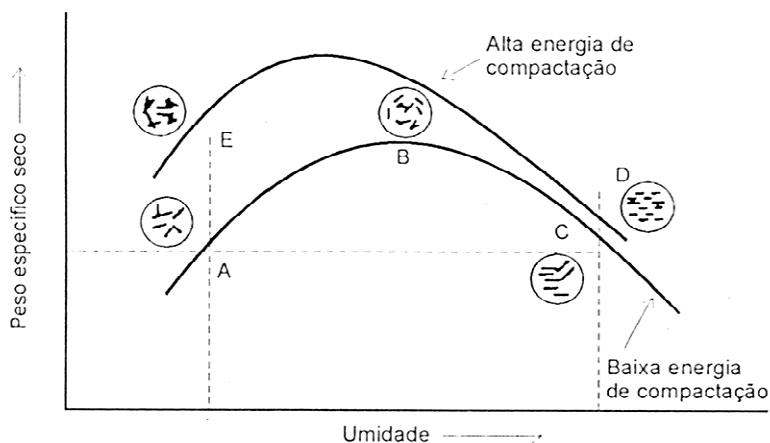
O teor de umidade de compactação do solo representa um parâmetro decisivo na eficiência do processo da compactação, proporcionando aparecimento de dois tipos de estruturas: a estrutura floculada (partículas ficam em contato face-aresta), formada pela compactação no ramo seco da curva, e a estrutura dispersa (as partículas tendem a se dispersar, tomando uma orientação paralela entre si), quando compactadas no ramo úmido. Para solos compactados no teor de umidade ótimo, com a energia de compactação Proctor Normal, tem-se uma estrutura intermediária entre estes dois tipos. O aumento da energia de compactação aumenta a orientação das partículas nesses solos.

No ramo seco da curva de compactação, a deficiência de água faz com que o ar presente nos vazios possa se comunicar diretamente à atmosfera através de pequenos canais, facilitando sua conseqüente expulsão do interior do solo. Entretanto, a pouca lubrificação das partículas e a possível ocorrência de elevados valores de poropressão negativa (presença de argilo-minerais) resultam em grandes dificuldades em sua densificação. Adicionalmente, Lambe e Whitman, (1979) destacam que a baixa umidade impede que a atração face-aresta das partículas seja vencida pela energia aplicada, resultando em uma estrutura floculada de solo (Figura 4.1).

No ramo úmido da curva de compactação, o excesso de água na matriz de solo (grau de saturação elevado) dificulta a expulsão do ar, pelo seu aprisionamento e conseqüente



formação de bolhas oclusas em seu interior. Nestas condições, a compactação resulta em um comportamento de solo caracterizado pela baixa resistência ao cisalhamento e elevada deformabilidade. Além disso, Lambe e Whitman, (1979) afirmam que os elevados valores de umidade aumentam a repulsão entre as partículas, provocando um posicionamento relativamente paralelo dos grãos (estrutura dispersa).



**Figura 4.1: Estrutura dos solos compactados (Massad, 2003)**

Os solos com estrutura floclada apresentam maior expansividade, maior condutividade hidráulica e maior resistência quando submetidos a pequenas deformações de cisalhamento que os solos de estrutura dispersa (Jucá, 1990 em Delgado, 2007).

Em relação aos solos granulares, a estrutura é simples, com partículas de forma arredondada ou angulosa, cujo principal constituinte geralmente é o mineral quartzo, podendo ainda ocorrer à presença de mica e feldspato entre outros. As partículas arenosas podem ser denominadas de “material inerte”, ou seja, material onde predominam esforços de natureza gravitacional, gerando um arranjo em que as partículas se apóiam diretamente umas sobre as outras. A compactação de solos arenosos é apenas um processo de densificação do material (Delgado, 2007).

As características estruturais impostas aos solos argilosos pelo processo de compactação, se por um lado muitas vezes se aplica aos solos tropical pouco intemperizados e solos saprolíticos, quase sempre não se aplica a aos solos tropicais profundamente intemperizados - solos lateríticos. Nesses solos, as partículas de argila são

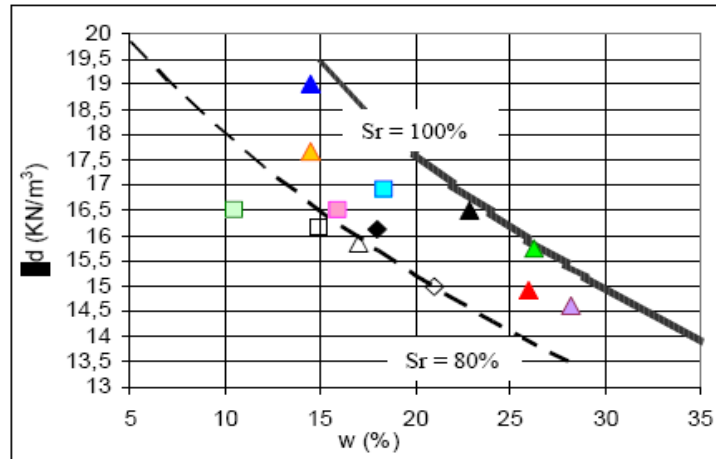
em grande parte integrantes dos agregados e possuem mobilidade restrita, sendo impedidas de se movimentarem de modo isolado no processo de compactação. Nesses solos a teoria estrutural de Lambe, não se aplica e a variação da umidade e energia de compactação apenas provocam maior ou menor quebra ou deformação dos agregados. O comportamento desses solos, principalmente hidráulico, tende a se aproximar do das areias.

Delgado (2007) realizou ensaios de Mini-Compactação (DNER-ME 254/94) nas energias Proctor normal (PN) e Proctor intermediária (PI), tendo-se por finalidade a determinação das curvas de compactação representativas de todos os materiais estudados. De modo geral, os solos menos intemperizados apresentam curvas mais achatadas que os intemperizados. A maior ou menor declividade do ramo seco a curva de compactação está ligada a maior ou menor lubrificação e a atividade das partículas, sendo que as partículas mais ativas são as que geralmente induzem a presença de maiores sucções implicando em maiores inclinações do ramo seco. No ramo úmido a maior ou menor declividade esta associada a maior ou menor drenabilidade e geração de pressão neutra. Cabe destacar que geralmente solos com curvas mais achatadas permitem a adoção de faixas de umidade mais amplas na compactação de campo.

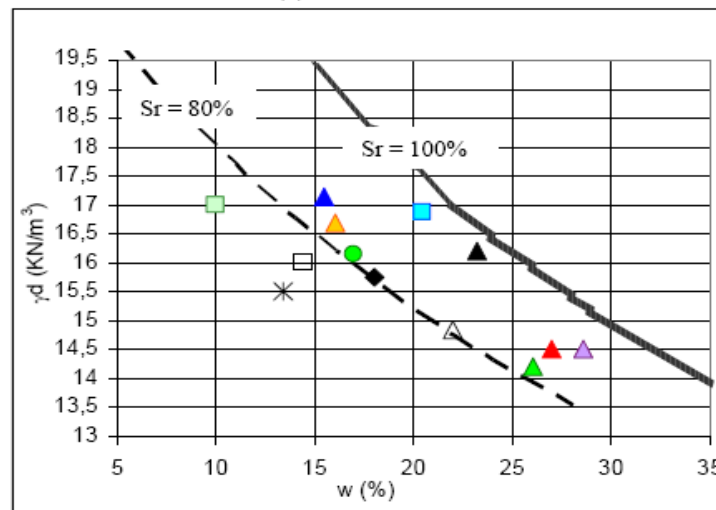
A Figura 4.2 apresenta os resultados de  $w_{ót}$  e  $\gamma_{d_{máx}}$  para o conjunto de solos estudados. É importante ressaltar que as curvas de saturação apresentadas representam uma curva média. Optou-se por tal consideração, uma vez que as curvas de saturação obtidas para cada tipo de solo não diferem significativamente da média, tornando válidas análises a partir de curvas de saturação médias.

De maneira geral constata-se que os parâmetros de mini-compactação obtidos para os solos HB apresentam valores superiores de  $w_{ót}$  em relação aos horizontes ZM e SF, se considerado o mesmo peso específico aparente seco. Aparentemente este comportamento se encontra ligado ao teor de argila presente nos materiais, o que justificaria estes se apresentarem mais próximos à linha de saturação total ( $S_r=100\%$ ). No entanto, na energia intermediária (Figura 6.1(b)) ocorre um distanciamento do solo HB7, o que pode ter sido ocasionado pela desestruturação mais efetiva quando do aumento da energia de compactação. Observa-se ainda que os solos ZM e SF apresentam saturação inferior, se

localizando mais próximos da curva de saturação  $S_r = 80\%$ .



(a) P.N.- 0% cal



(b) P.I. - 0% cal

LEGENDA							
△	HB7	▲	HB9	▲	HB10	▲	HB11
◇	ZM3	◆	ZM6	▲	▲	▲	HB12
□	SF2	■	SF4	■	■	■	HBR1
		■	SF8	■	■	■	HBR2
		■	SF13				

**Figura 4.2: Parâmetros de Mini-Compactação (Delgado, 2007)**

### 4.3.2 Perda de Massa por Imersão

Trata-se de um dos ensaios que compõe a metodologia MCT, normalizado no método de ensaio DNER-ME 256/94. No trabalho de Delgado (2007) optou-se pela sua realização, uma vez que os solos compactados trabalham, na maioria das vezes, em condições de saturação parcial, com ciclos de secagem e umedecimento alternados. Sendo

assim, torna-se importante a verificação da sua capacidade de erodibilidade, quando em situação de total saturação. Com este intuito, determinou-se a PMI em todos os solos trabalhados, considerando apenas as energias equivalentes ao Proctor Normal (5 golpes) e Proctor Intermediário (8 golpes). Quanto às unidades de compactação usadas, foram ensaiados corpos de prova em todas as unidades trabalhadas, tanto no teor ótimo, quanto nos ramos seco e úmido. Destaca-se ainda que, foram usadas 2 amostras compactadas por condição de umidade e energia.

A Tabela 4.8 sumariza os resultados obtidos para os ensaios de compactação. Delgado (2007) ressalta que ao se analisar em conjunto os parâmetros de compactação apresentados e os resultados granulométricos, mineralógicos e químicos, nota-se que a mudança de comportamento na compactação se encontra associada à junção destes três parâmetros e não apenas a composição mineralógica.

**Tabela 4.8: Resultados obtidos para os ensaios de compactação (Delgado, 2007)**

Amostra	Proctor Normal (5 Golpes)			Proctor Intermediário (8 Golpes)		
	wot (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	PMI (Wot)	wot (%)	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	PMI (Wot)
HB7	30,0	14,3	40,0	17,0	15,9	30,0
HB9	32,0	13,3	25,0	26,0	14,9	20,0
HB10	15,0	17,1	52,0	27,2	14,0	55,0
HB11	17,0	17,4	63,0	14,5	19,0	57,0
HB12	29,0	14,8	0,0	26,3	15,8	0,0
ZM3	20,6	14,8	76,0	21,0	15,0	81,0
ZM5						
ZM6	21,0	15,2	67,0	18,0	16,1	50,0
SF1						
SF2	19,0	15,3	67,0	15,0	16,2	62,0
SF4	20,5	16,4	50,0	18,4	16,9	45,0
SF8	11,0	15,9	76,0	10,5	16,5	70,0
SF13	18,0	16,2	78,0	16,0	16,5	65,0

### 4.3.3 Curvas Características

A pressão isotrópica da água intersticial, fruto de condições físico-químicas que fazem com que o sistema água/solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais e aumentando ou reduzindo o grau de saturação, é definida como sucção. A sucção normalmente é dividida em dois componentes: o componente matricial (dependente

da estrutura e da composição do solo), definido como a diferença entre a pressão de ar e a pressão de água nos vazios ( $u_a - u_w$ ) e que tende a desaparecer com a saturação, e o componente osmótico (dependente da concentração química da água do solo). A sucção total é soma da sucção matricial e da sucção osmótica (Miguel *et al.*, 2006).

A relação entre o teor de umidade ou o grau de saturação e a sucção matricial é definida como curva característica de retenção de água, sendo que alguns autores a designam como simplesmente curva característica ou ainda como curva de retenção de água. Esta curva é uma propriedade do solo que determina a quantidade de água que um solo pode perder ou ganhar ao se variar a tensão de sucção. Os dois pontos principais das curvas características são os valores das sucções matriciais correspondentes à entrada de ar nos macroporos e o grau de saturação em que a fase líquida começa a ficar descontínua e, conseqüentemente, torna-se muito difícil remover água do corpo de prova por drenagem.

A determinação das curvas características de sucção é feita em laboratório seguindo trajetórias de secagem – quando uma amostra previamente saturada é exposta a potenciais matriciais gradualmente maiores, com sucessivas medidas desses valores em função do teor de umidade de equilíbrio de cada estágio – ou de umedecimento – quando uma amostra seca ao ar tem seu potencial matricial reduzido gradualmente, também com sucessivas medidas do potencial em função do teor de umidade de equilíbrio em cada estágio. As curvas obtidas pelos processos de secagem e de umedecimento não coincidem, dando origem ao fenômeno denominado de histerese da curva característica de sucção. A histerese é atribuída a diversas causas: não uniformidade geométrica de cada poro, efeito do ângulo de contato (maior, quando ocorre umedecimento do solo, e menor, na fase de secagem), bolhas de ar capturadas nos vazios do solo durante a fase de umedecimento e alterações na estrutura do solo decorrentes da expansão ou contração, associadas aos ciclos de umedecimento ou secagem (Miguel *et al.*, 2006).

Os principais fatores que interferem na forma da curva característica de sucção dos solos são a distribuição dos macroporos (interagregados) e dos microporos (intra-agregados) e a mineralogia das partículas. Solos granulares tendem a apresentar perda brusca de umidade, quando a sucção ultrapassa um determinado valor de entrada de ar dos macroporos enquanto solos finos tendem a exibir curvas mais suaves (Miguel *et al.*, 2006).

Na literatura há várias equações propostas para representar a forma das curvas características dos solos, sendo que a grande maioria adota funções logarítmicas ou exponenciais (Delgado, 2007).

A distribuição de poros no solo pode ir desde uma situação em que eles sejam praticamente homogêneos, como por exemplo, para uma areia uniforme, até o caso onde ocorra a distribuição com concentrações em determinados tamanhos de poros. Sendo assim, o solo poderá ter dois (distribuição bimodal) ou mais tamanho de poros predominantes. Destaca-se ainda que para os solos lateríticos finos e profundamente intemperizados, a estrutura agregada dos solos, típica dos solos tropicais, faz com que, na prática, se comportem como siltes e até como areias finas. Nestes casos, a curva característica é marcada por duas entradas de ar, sendo o primeiro referente à entrada de ar nos macroporos, para pequenos valores de sucção, e o segundo diz respeito à entrada de ar nos microporos, para valores de sucção mais elevados, sendo consideradas curvas características bimodais.

Dentre as diversas propriedades dos solos, a história de tensões e o teor de umidade inicial, aparentemente, têm a maior influência sobre a estrutura e agregação que dominam a natureza da curva característica para solos de granulação fina. Amostras de um solo particular, apesar de terem a mesma estrutura e mineralogia, podem exibir diferentes curvas características, se forem preparadas a diferentes teores de umidade inicial e se possuírem diferentes histórias de tensões (Camapum *et al* , 2009). Como resultado, o comportamento de engenharia de tais solos também será diferente (Delgado, 2007).

#### **4.3.3.1 Resultados dos ensaios realizados por Delgado (2007).**

Objetivando a associação de níveis de saturação com o comportamento mecânico dos materiais é de fundamental importância a determinação das curvas características dos mesmos para os diferentes teores de umidade passíveis de ocorrer *in situ*. No trabalho realizado por Delgado (2007) foram determinadas curvas características para a umidade ótima, para o ramo seco e o úmido da curva de compactação. Foram ainda determinadas curvas características em diferentes energias de compactação e também a partir de amostras

indeformadas, com a finalidade de determinar o efeito da compactação para cada tipo de material.

Destaca-se que, em um primeiro momento, as curvas características compactadas foram trabalhadas na trajetória de umedecimento (TU) para a seguir, ser utilizada uma trajetória mista. Entendendo-se por trajetória mista (TM), uma junção das trajetórias de secagem e umedecimento, ou seja, metade dos corpos de prova foi deixada a secar e na outra metade acrescentou-se água destilada (umedecimento). É importante ressaltar que não foi adotada a trajetória de secagem, devido à desagregação sofrida pelos corpos de prova moldados a partir de amostras indeformadas. Após atingir os percentuais de saturação desejados, utiliza-se o papel filtro quantitativo Whatman n<sup>o</sup> 42 para determinação da sucção. Determinada a sucção, após 15 dias de tempo de equilíbrio, os corpos de prova são submetidos ao ensaio da balança hidrostática (ABNT NBR-10838 - MB-288) e determinação de umidade com o auxílio da estufa. De posse dos dados experimentais, as curvas características foram representadas em termos de sucção x umidade, a sucção sendo mostrada em pF, que é o logaritmo da sucção em centímetros de coluna de água.

Destaca-se ainda que, para os solos SF8, HBR1 e HBR2 não foi possível a retirada de blocos indeformados, portanto não serão apresentadas as curvas correspondentes às amostras indeformadas dos mesmos. A Tabela 4.9 apresenta dos resultados obtidos por Delgado (2007) para amostras indeformadas. Ao plotar todas as curvas características dos solos em que foi possível a retirada de blocos a autora evidencia alguns pontos importantes, tais como:

- Pontos de entrada de ar, seja nos poros dos solos monomodais ou nos macroporos dos solos bimodais, variando entre 2 e 10 kPa para solos de granulometria e formações distintas;
- Pontos de entrada de ar dos microporos apresentam grande variação de tensão de sucção (1000 a 10000 KPa).
- É nítida a variação comportamental apresentada nas curvas características, em termos de teor de umidade, quando ocorre modificação do tipo de solo. No entanto, ao se

considerar essas curvas com a sucção em função do grau de saturação, esse comportamento não é tão evidente para os solos SF.

**Tabela 4.9: Curvas Características para Amostras Indeformadas (Delgado, 2007).**

Amostra	e	EAMA (kPa)	B <sub>0</sub> (kPa)	wB <sub>0</sub> (%)	SrB <sub>0</sub> (%)	EAMI (kPa)	wEAMI (kPa)	SrEAMI (%)
HB7	0,8	20,0	55,0	17,0	59,5	3652,0	5,6	19,5
HB9	0,8	4,7	10,5	17,8	75,4	6937,0	3,8	17,9
HB10	1,0	5,2	10,9	16,4	47,9	5689,5	5,1	16,1
HB11	1,1	5,2	13,4	18,4	50,0	3211,1	10,2	25,7
HB12	1,1	x	x	x	x	3652,0	19,0	50,6
HBR1	x	x	x	x	x	x	x	x
HBR2	x	x	x	x	x	x	x	x
ZM3	0,6	15,5	16,5	19,0	83,1	4087,0	10,0	44,7
ZM5	x	x	x	x	x	x	x	x
ZM6	0,8	2,0	x	x	x	1005,0	5,6	19,5
SF1	x	x	x	x	x	x	x	x
SF2	0,8	4,4	x	x	x	3319,0	2,9	15,2
SF4	0,7	x	x	x	x	6760,0	1,3	5,4
SF8	x	x	x	x	x	x	x	x
SF13	1,1	2,0	2,0	37,6	96,5	10025,0	8,5	20,2

onde:

$e_0$  = índice de vazios inicial;

EAMA = Pressão de entrada de ar dos macroporos;

B<sub>0</sub> = Pressão correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos;

w B<sub>0</sub> = teor de umidade correspondente ao ponto B<sub>0</sub>;

Sr B<sub>0</sub> = saturação correspondente ao ponto B<sub>0</sub>;

EAMI = pressão de entrada de ar nos microporos;

w EAMI = teor de umidade correspondente ao ponto EAMI;

Sr EAMI = saturação correspondente ao ponto EAMI.

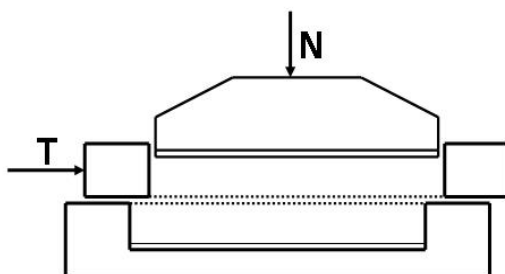
x = não definido ou curvas não determinadas

#### 4.3.4 Ensaio de Cisalhamento Direto de Solos

O ensaio de cisalhamento direto consiste no mais antigo procedimento experimental para determinação da resistência ao cisalhamento e deformabilidade dos solos, baseando-se diretamente no critério de ruptura de Coulomb. O princípio básico do ensaio relaciona-se a aplicação de uma tensão normal num plano e verificação da tensão cisalhante que provoca a ruptura da amostra (Sousa Pinto, 2002).

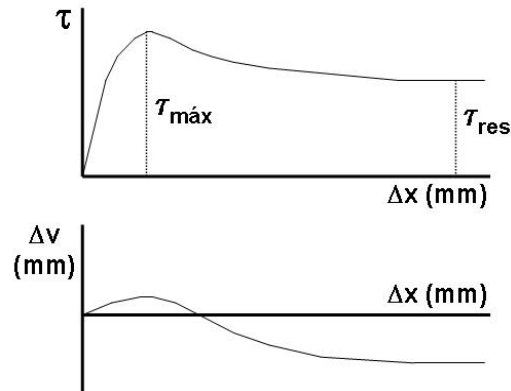


De maneira geral, pode-se destacar que o ensaio é realizado por meio da colocação de um corpo de prova de solo (amostra natural ou moldada) em uma caixa de cisalhamento, devendo a parte superior da caixa ser passível de deslocamento horizontal (Figura 4.3). A primeira etapa na realização do ensaio consiste na aplicação de uma força vertical  $N$  para promover uma densificação inicial (redução do índice de vazios) da amostra.



**Figura 4.3: Detalhe da caixa de cisalhamento**

O ensaio de cisalhamento direto propriamente dito consiste na aplicação de um deslocamento na parte superior da caixa sob velocidade constante, permitindo o registro da força suportada pelo solo (por meio de um anel de carga) e seu conseqüente deslocamento vertical (por meio de um extensômetro). A divisão das forças normais ( $N$ ) e tangenciais ( $T$ ) pela área da seção transversal do corpo de prova permitem a determinação das tensões normais ( $\sigma$ ) e tangenciais ( $\tau$ ) atuantes no interior da amostra. Assim, de posse dos registros da tensão cisalhante e do deslocamento horizontal e vertical da amostra para cada ciclo de tensões normais torna-se possível a construção das Figuras de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e de deformação vertical (variação de volume) versus deslocamento horizontal (Figura 4.4). Segundo Cardoso (2002), a resistência ao cisalhamento dos solos varia, principalmente para solos saturados, de acordo com a velocidade e o tempo de aplicação das cargas.



**Figura 4.4: Resultado de um ensaio de cisalhamento direto**

Na curva tensão-deformação anteriormente apresentada podem ser identificadas a tensão máxima de ruptura ( $\tau_{MÁX}$ ) e a tensão residual ( $\tau_{RES}$ ) que o corpo de prova ainda sustenta depois de ultrapassada a situação de ruptura. Estes valores são fundamentais para determinação do ângulo de atrito de pico e do ângulo de atrito residual. Adicionalmente, através da curva variação de volume versus deslocamento horizontal pode-se observar a tendência de contração ou expansão do material durante o processo de cisalhamento.

No caso específico das curvas destacadas na Figura 4.3, suas formas relacionam-se ao comportamento dilatante que os solos arenosos densos ou argilosos pré-adensados tendem a apresentar. Assim, caracterizam-se por um pico acentuado de resistência, com posterior redução e estabilização em um valor residual. Além disso, pode ser observada uma tendência de aumento de volume (dilatância) principalmente nas fases iniciais do cisalhamento. Já nos materiais arenosos em condição fofa ou argilas normalmente adensadas, a curva de tensão-deformação apresenta resistência crescente, com redução contínua de seu volume.

Dessa forma, construídas as curvas de tensão-deformação para diferentes níveis de tensão normal, torna-se possível a obtenção da envoltória de resistência dos materiais, permitindo a posterior determinação dos parâmetros de resistência (ângulo de atrito de pico, ângulo de atrito residual e coesão) dos solos.

A resistência por atrito entre as partículas pode ser definida como a força tangencial necessária para ocorrer o deslizamento de um plano, em outro paralelamente a este. Esta

força também é proporcional à força normal ao plano. O ângulo formado entre a força normal e a resultante das forças, tangencial e normal, é chamado de ângulo de atrito  $\Phi$ , sendo o máximo ângulo que a força cisalhante pode ter com a normal ao plano sem que haja deslizamento.

A resistência ao cisalhamento dos solos é devida essencialmente ao atrito entre os grãos, mas a atração química entre partículas, independente da força normal, tem uma parcela de resistência significativa em determinados tipos de solos, que é denominada coesão real. A coesão real não pode ser confundida com a coesão aparente, presente principalmente em solos argilosos úmidos não saturados, determinada pela pressão capilar da água. Essa resistência desaparece à medida que o solo vai sendo saturado (Silva e Carvalho, 2007).

Os parâmetros intercepto de coesão e ângulo de atrito interno determinados conforme Lambe (1979), ajustando-se à equação de Coulomb ( $\tau = c + \sigma_n \tan \Phi$ ) os valores de tensão de cisalhamento obtidos com a aplicação de tensões normais, sendo  $\tau$  = tensão cisalhante (kPa);  $c$  = intercepto de coesão do solo (kPa);  $\sigma_n$  = tensão normal aplicada (kPa) e  $\Phi$  = ângulo de atrito interno do solo (Viecilli, 2003).

O ensaio de cisalhamento direto foi o processo de laboratório usado por Cardoso (2002) para determinação do ângulo de atrito ( $\Phi$ ) e da coesão ( $c$ ) e, conseqüentemente, do envoltório de resistência do solo. O autor optou por esse ensaio devido à necessidade de controlar o plano de ruptura e assim facilitar a comparação de resultados.

Foram usadas amostras de seção quadrada com laterais de 6 cm e altura de 2,5 cm, moldadas a partir de blocos indeformados e levados a ruptura na prensa mecanizada da *Wykehan Farrance*, sob pressões de adensamento que variaram, dependendo da amostra, de 12,5 a 200 kPa. Os ensaios foram do tipo consolidado drenado (CD), com consolidação em períodos que variaram de 30 min a 2 h, dependendo da pressão normal e do tempo necessário a estabilização das deformações. O tempo mínimo de inundação foi de 24 h sob carga normal de consolidação. De modo a eliminar a influencia da sucção, foram ensaiadas apenas amostras saturadas. A velocidade de aplicação da tensão cisalhante e/ou a velocidade de deformação do corpo de prova foram lentas ( $4,6 \times 10^{-2}$  mm/min). Para os cálculos seguiu-se a formulação padronizada, tendo sido considerada a área corrigida no

cálculo das tensões cisalhantes. Os resultados obtidos por Cardoso (2002) são apresentados na Tabela 4.10.

Cardoso (2002) destaca a importância de descrever as orientações escolhidas para as amostras na execução dos ensaios. No caso dos solos estudados, as amostras relativas ao Horizonte B, não apresentavam descontinuidades visíveis e pode-se definir qualquer direção. Já para os solos da zona mosqueada e para os saprólitos finos as amostras apresentavam elevados graus de heterogeneidade e, na tentativa de se introduzir o mínimo possível de influências da estrutura dos solos sob o resultado final do experimento, optou-se por manter os corpos de prova na direção N-S de campo e com a mesma inclinação do local de coleta.

**Tabela 4.10: Resultados do ensaio de cisalhamento (Cardoso, 2002).**

Amostra	$\Phi$	c (kPa)
HB7	26,7	3,2
HB9a	31,3	0,0
HB9b	30,3	1,4
HB10	27,5	0,0
HB11	30,8	2,9
HB12	32,3	7,7
ZM3	31,7	29,3
ZM5	33,3	3,4
ZM6	29,0	0,0
SF1	30,4	13,8
SF2	38,8	34,2
SF4	23,2	16,6
SF8	30,0	13,4
SF13	46,3	7,5

## 6. Análises Estatísticas

São aqui utilizadas técnicas estatísticas de regressão e correlação entre os diversos parâmetros obtidos por Cardoso (2002) e Delgado (2007) a fim de avaliar quais características dos solos influenciam cada um dos parâmetros a serem analisados, em especial, os parâmetros referentes ao comportamento mecânico dos solos. Com isso espera-se:

- Por meio da análise dos coeficientes de correlação, contribuir para o entendimento dos processos de evolução e intemperismo dos solos e como esses influenciam as características físico-químico-mineralógicas e microestruturais dos mesmos;
- Obter uma estimativa dos parâmetros geotécnicos para elaboração de projetos de engenharia partindo do conhecimento do valor de outras variáveis especialmente os parâmetros físicos, dada a facilidade de sua obtenção.

Serão ainda realizados testes das equações desenvolvidas para a previsão de parâmetros em outros solos lateríticos, cujos dados estejam disponíveis na literatura, tais como Oliveira (2006), Guimarães (2006), Delgado (2002) entre outros.

Cardoso (2002) apresenta uma análise das correlações entre os resultados obtidos de ensaios geotécnicos. Contudo, em termos de parâmetros geotécnicos, o autor dispunha apenas de dados de ângulo de atrito, coesão e de sucção, sendo que o último obtido em ensaios com centrifugação de amostras que são menos confiáveis que os realizados por Delgado (2007), uma vez que esta metodologia não permite o controle da variação volumétrica das amostras e esta afeta diretamente a sucção do solo. A contribuição pretendida com este estudo é ampliar as análises realizadas pelo autor, incluindo resultados de parâmetros físicos, químicos e mineralógicos levantados por Delgado (2007) e incluindo análises de regressão linear múltipla para avaliar a influência da composição químico/mineralógica nas propriedades físicas e geomecânicas dos solos.

## **6.1 Seleção das variáveis**

Um dos grandes desafios para a realização de análises estatísticas é a seleção de variáveis. Idealmente, busca-se a utilização do menor número de variáveis possível para justificar o comportamento de um determinado parâmetro (variável dependente).

Para auxiliar na seleção das variáveis diversas metodologias de inteligência artificial vêm sendo desenvolvidos, tais como redes neurais, análise discriminante, algoritmo C4.5, entre outros (Rodrigues *et al.*, 2008). Contudo, para este trabalho optou-se pela seleção das variáveis com base em considerações empíricas já apresentadas na literatura e análise de parâmetros estatísticos como os coeficientes de correlação, variância, entre outros. Considera-se que, futuramente, poderão ser realizados trabalhos comparando os resultados obtidos conforme a metodologia aqui desenvolvida e os obtidos com auxílio de técnicas de inteligência artificial.

### **6.1.1 Classificação dos solos**

Delgado (2007) realizou a classificação dos solos segundo as metodologias MCT, SUCS e TRB. Adicionalmente, com base nas análises das propriedades química, físicas e mineralógicas e utilizando-se do método de seleção por principais componentes Cardoso (2002) conclui que as amostras avaliadas em sua tese distinguiam-se em três grupos amostrais – arenosos, siltosos e argilosos. A Tabela 6.1 apresenta as classificações dos solos aqui analisados segundo cada uma dessas metodologias.

**Tabela 6.1: Classificações dos solos: MCT, SUCS, TRB e Cardoso (2002).**

Amostra	Cardoso (2002)	MCT	SUCS	TRB
HB7	argiloso	LG'	SM	A-7-5
HB9	argiloso	NA'	ML	A-5
HB10	arenoso	LG'	SM	A-2-6
HB11	arenoso	LG'	SM	A-2-6
HB12	siltoso	NG'	MH	A-7-5
ZM3	arenoso	LG'	SC	A-3
ZM5	arenoso	-	ML	A-4
ZM6	siltoso	LG'	CL	A-6
SF1	siltoso	-	ML	A-7-6
SF2	siltoso	LG'	CL	A-6
SF4	siltoso	LG'	CL	A-6
SF8	arenoso	NG'	SC	A-2-4/A-2-5
SF13	siltoso	NG'	SM	A-4

Idealmente, os solos integrantes de um determinado grupo/classe deveriam apresentar propriedades relativamente homogêneas entre si e diferenciadas com relação aos outros grupos/classes. A fim de identificar qual das classificações divide as amostras aqui avaliadas de maneira que os grupos melhor atendam a esse requisito foi aplicada a metodologia da análise de variância (ANOVA) tomando como base parâmetros relacionados a granulometria dos solos tais como o coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ) e o  $D_{50}$  que corresponde ao diâmetro tal que 50% das partículas de solo sejam inferiores a ele, ambos considerados sem o uso de defloculante. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 6.2. Não foi utilizada a técnica da ANOVA para a classificação TRB em virtude do grande número de classes de acordo com essa metodologia, que divide os treze solos analisados em nove grupos, vários deles com apenas um elemento.

Como explicado no item 2.6.3, segundo a técnica da ANOVA, para que se considere o grupo estatisticamente homogêneo e diferente dos demais grupos, o coeficiente  $MQ_e/MQ_d$  ou  $F$  deve ser superior ao índice de Fisher ( $F_{crítico}$ ). Para um grau de significância ( $\alpha$ ) de 0,5, não houve diferença considerável entre as médias dos grupos para divisão proposta pela metodologia MCT. Para a classificação SUCS houve diferença significativa entre as médias apenas para o  $D_{50}$ . Tanto para o parâmetro  $C_u$  quanto  $D_{50}$

houve diferenças significativas entre as médias para a classificação proposta por Cardoso (2002).

Foi selecionada para o presente estudo a metodologia proposta por Cardoso (2002) por ser a mais simples, considerando que tem o menor número de grupos e que sua classificação pode ser obtida apenas com base na granulometria do solo com o uso de defloculante.

**Tabela 6.2: Análise de Variância: classificações MCT, SUCS e Cardoso (2002).**

Cardoso 2002									
Anova: fator único - D50					Anova: fator único - Cu				
RESUMO					RESUMO				
<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>	<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
Argila	2	0.10	0.05	0.00	Argila	2	19.58	9.79	4.25
Silte	6	0.09	0.02	0.00	Silte	6	28.17	4.69	1.77
Areia	5	1.20	0.24	0.03	Areia	5	266.97	53.39	164.03
ANOVA					ANOVA				
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>
Entre grupos	0.145523	2.00	0.07	6.47	Entre grupos	6959.672	2.00	3479.84	52.00
Dentro dos grupos	0.112484	10.00	0.01		Dentro dos grupos	669.2203	10.00	66.92	
Total	0.258007	12.00			Total	7628.893	12.00		
MCT									
Anova: fator único - CU					Anova: fator único - D50				
RESUMO					RESUMO				
<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>	<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
LG'	7	192.53	27.50	829.96	LG'	7	1.00	0.14	0.03
NG'	3	56.03	18.68	463.31	NG'	3	0.28	0.09	0.02
-	2	57.83	28.92	1258.35	-	2	0.07	0.03	0.00
ANOVA					ANOVA				
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>
Entre grupos	191.1274	2.00	95.56	0.12	Entre grupos	0.020449	2.00	0.01	0.40
Dentro dos grupos	7164.707	9.00	796.08		Dentro dos grupos	0.232261	9.00	0.03	
Total	7355.835	11.00			Total	0.25271	11.00		
SUCS									
Anova: fator único - Cu					Anova: fator único - D50				
RESUMO					RESUMO				
<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>	<b>Grupo</b>	<b>Contagem</b>	<b>Soma</b>	<b>Média</b>	<b>Variância</b>
SM	4	112.19	28.05	499.07	SM	4	0.49	0.12	0.01
CL	3	11.83	3.94	0.73	CL	3	0.04	0.01	0.00
ML	3	66.17	22.06	770.40	ML	3	0.10	0.03	0.00
SC	2	118.53	59.26	495.20	SC	2	0.75	0.38	0.03
ANOVA					ANOVA				
<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>
Entre grupos	3734.993	3.00	1245.00	2.82	Entre grupos	0.185265	3.00	0.06	7.98
Dentro dos grupos	3534.681	8.00	441.84		Dentro dos grupos	0.061925	8.00	0.01	
Total	7269.674	11.00			Total	0.24719	11.00		



Com base nos estudos realizados Cardoso (2002) afirma que (i) os grupos amostrais apresentam comportamentos distintos, sendo a fração granulométrica predominante a principal característica distintiva entre cada um deles, (ii) as propriedades físicas comportam-se, normalmente, em função da granulometria e ainda, (iii) que cada um dos diferentes grupos apresenta suas próprias características químicas e mineralógicas, conforme resumido na Tabela 6.3.

**Tabela 6.3: Propriedades Químicas e Mineralógicas para cada tipo de solo .  
(Cardoso, 2002).**

<b>Amostras</b>	<b>Fração Granulométrica Predominante (com defloculante)</b>	<b>Propriedades Químicas e Mineralógicas</b>
HB10, HB11, ZM3, ZM5 e SF8	Areia	Quartzo
HB12, ZM6, SF1, SF2, SF4 e SF13	Silte	Quartzo, Illita
HB7 e HB9	Argila	Caulinita, hematita, goethita, TiO <sub>2</sub> , Gibbsita, Alumina, pH KCl, MO.

As análises estatísticas realizadas no presente estudo consideram duas situações. Na primeira todas as amostras foram consideradas como sendo retiradas de populações com o mesmo valor médio para as propriedades analisadas. Numa segunda hipótese, considerou-se que existem diferenças significativas entre as amostras e que as mesmas pertenceriam a populações com médias distintas. A classificação proposta por Cardoso (2002) foi utilizada como parâmetro para diferenciar as populações de solos, dividindo-os em arenosos, argilosos e siltosos.

## **6.2 Análises Estatísticas – Propriedades químicas**

A Tabela 6.4 resume todos os dados levantados pelos autores e inicialmente considerados como possíveis parâmetros para as análises estatísticas a serem realizadas. No total, são 25 variáveis que podem ser divididas em quatro grupos: i) pH (pH H<sub>2</sub>O, pH KCl, delta pH), ii) concentração de íons, considerados individualmente ou na Capacidade de Trocas Catiônicas (CTC); iii) concentração de minerais e (iv) concentração de matéria

orgânica. A seguir serão realizadas algumas análises para seleção dos parâmetros mais relevantes para as análises propostas para o presente trabalho.

O primeiro passo para se trabalhar os dados foi calcular os parâmetros estatísticos descritivos tais como a média, mediana, desvio padrão e o coeficiente de variação. Para auxiliar nas análises calculou-se também a razão entre a mediana e a média (Q). Para amostras bem distribuídas os valores médios são próximos da mediana ( $Q=1$ ). Quocientes muito distintos indicam a existência de dados discrepantes entre as amostras consideradas.

Para a análise dos dados e seleção das variáveis foram adotadas duas premissas com relação à ocorrência de um determinado componente nos diferentes tipos de solo:

**Premissa 1:** Considerou-se a ocorrência de um determinado componente em concentrações similares nos diferentes tipos de solos, tomando a classificação em solos argilosos, arenoso e siltosos realizadas por Cardoso (2002) como parâmetro, como um indicativo de que a presença desse componente não interfere de maneira significativa nas propriedades dos mesmos.

- **Premissa 2:** Considerou-se a ocorrência de concentrações muito diferentes de um determinado parâmetro em um mesmo tipo de solo como um indicativo de que a presença desse componente não interfere consideravelmente nas propriedades do mesmo.

Ressalta-se que essas premissas são simplificações para facilitar a análise dos dados e a eventual existência de reações como neutralização ou catalisação serão consideradas na análise dos resultados.

**Tabela 6.4: propriedade química obtidas por Cardoso (2002) e Delgado (2007).**

Amostra	Delta pH	CTC cmolc/kg	MO %	Ca Mg cmolc/kg	K cmolc/kg	Al cmolc/kg	H cmolc/kg	Al2O4 (%)	CaO (%)	K2O (%)	MgO (%)	SiO2 (%)	TiO2 (%)	PF (%)	Quartzo (%)	Kr (%)	Gibbsita (%)	Caulinita (%)	Illita (%)	Goethita (%)	Hematita (%)	Fe2O3 Disperso (%)	Fe2O3 Nódulos (%)
HB7	-0.7	0.8	0.5	0.1	0.0	0.6	0.2	29.6	0.0	0.2	0.1	38.0	1.7	17.2	22.3	0.7	23.1	31.0	2.4	3.6	10.9	4.3	8.9
HB9	-0.5	1.3	0.4	0.0	0.0	0.3	0.9	40.0	0.0	0.1	0.0	25.7	2.2	20.0	3.7	0.5	30.7	45.1	1.9	1.6	11.4	3.8	8.3
HB10	-0.5	2.2	0.7	0.2	0.0	0.2	1.8	10.4	0.1	0.2	0.0	78.2	0.5	6.1	69.2	1.7	6.3	16.9	2.2	0.8	3.4	1.8	2.0
HB11	0.2	1.7	0.6	0.2	0.0	0.5	1.0	13.7	0.1	0.1	0.0	67.7	0.9	9.9	63.4	1.2	18.2	9.2	0.0	1.8	5.7	1.9	4.9
HB12	-1.4	6.0	0.7	0.4	0.1	1.1	4.4	19.6	0.1	4.1	0.9	57.1	0.8	7.9	33.6	1.3	5.5	26.5	21.9	3.4	6.3	2.3	6.3
ZM3	-0.1	0.8	0.2	0.2	0.0	0.0	0.6	3.7	0.1	0.6	0.0	92.6	0.1	1.5	88.6	2.0	1.3	5.1	3.2	0.1	1.6	0.4	1.3
ZM5	-0.4	2.0	0.2	0.3	0.0	0.1	1.7	17.6	0.1	4.0	0.2	66.7	0.8	3.9	54.2	1.3	11.1	3.8	12.0	2.9	3.2		
ZM6	-0.9	0.8	0.0	0.2	0.0	0.0	0.6	21.6	0.0	1.6	0.3	53.9	0.9	3.3	30.3	1.1	3.4	46.8	3.7	1.5	11.7	1.4	11.6
SF1	-0.6	2.2	0.2	0.3	0.0	0.0	1.9	18.1	0.0	3.8	0.6	62.8	0.7	4.9	35.3	1.5	0.6	34.7	22.2	0.9	7.7		
SF2	0.7	1.4	0.1	0.3	0.0	0.1	1.0	19.8	0.1	3.3	0.6	67.3	0.8	4.4	46.2	1.5	2.3	26.3	17.1	2.0	5.0	1.8	5.0
SF4	-0.7	1.5	0.2	0.2	0.0	0.0	1.3	18.9	0.1	4.3	0.3	65.0	0.9	5.0	32.1	1.9	6.6	24.1	26.8	1.7	3.6	1.8	2.9
SF8	-0.3	3.0	0.1	0.1	0.1	0.4	2.4	4.4	0.1	0.1	0.0	86.9	0.4	2.8	81.7	1.9	2.1	11.2	0.0	1.5	3.1	3.1	0.8
SF13	-0.5	0.9	0.3	0.3	0.0	0.0	0.6	17.2	0.1	4.3	0.5	67.2	0.7	3.5	45.1	1.6	1.2	18.6	26.3	3.0	3.6	2.0	3.6
Media	-0.4	1.9	0.3	0.2	0.0	0.3	1.4	18.0	0.1	2.0	0.3	63.8	0.9	6.9	46.6	1.4	8.6	23.0	10.7	1.9	5.9	2.2	5.0
Mediana	-0.5	1.5	0.2	0.2	0.0	0.1	1.0	18.1	0.1	1.6	0.2	66.7	0.8	4.9	45.1	1.5	5.5	24.1	3.7	1.7	5.0	1.9	4.9
Desvio Padrao	0.5	1.4	0.2	0.1	0.0	0.3	1.1	9.6	0.0	1.9	0.3	18.0	0.5	5.6	24.2	0.5	9.6	14.0	10.6	1.1	3.5	1.1	3.4
Coef. Variação	-119.0	74.0	74.8	45.6	87.9	127.4	77.9	53.2	44.3	93.0	110.6	28.2	61.3	81.3	52.0	32.4	110.6	60.9	98.9	55.1	58.2	48.8	68.1
Mediana/Media	1.2	0.8	0.7	1.1	0.8	0.4	0.7	1.0	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	0.7	1.0	1.1	0.6	1.0	0.3	0.9	0.8	0.9	1.0
Media	-0.6	1.0	0.4	0.1	0.0	0.5	0.6	34.8	0.0	0.2	0.1	31.8	1.9	18.6	13.0	0.6	26.9	38.1	2.2	2.6	11.2	4.1	8.6
Desvio Padrao	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.2	0.5	7.3	0.0	0.0	0.0	8.7	0.3	2.0	13.2	0.2	5.4	10.0	0.4	1.4	0.4	0.3	0.4
Coef. Variação	-23.6	31.3	17.7	56.6	20.2	47.1	87.9	21.1	47.1	25.0	28.3	27.2	18.0	10.7	101.2	26.8	20.0	26.2	16.4	54.4	3.2	7.5	4.7
Media	-0.4	1.8	0.4	0.2	0.0	0.2	1.3	16.4	0.1	1.5	0.2	65.3	0.8	6.2	49.0	1.4	7.4	26.1	7.8	1.4	6.9	1.9	5.9
Mediana	-0.3	2.0	0.2	0.2	0.0	0.2	1.7	10.4	0.1	0.2	0.0	78.2	0.5	3.9	69.2	1.7	6.3	9.2	2.2	1.5	3.2	1.9	1.6
Desvio Padrao	0.3	0.8	0.3	0.1	0.0	0.2	0.7	6.0	0.0	1.7	0.1	11.5	0.3	3.3	13.8	0.3	7.0	5.2	5.0	1.1	1.5	1.1	1.8
Coef. Variação	-60.7	45.6	74.7	23.4	144.5	107.3	53.7	36.5	24.8	111.7	48.5	17.6	41.1	53.0	28.3	24.7	94.2	20.0	63.9	76.5	21.4	58.1	31.1
Mediana/Media	0.7	1.2	0.6	1.0	0.8	0.8	1.3	0.6	1.3	0.1	0.0	1.2	0.7	0.6	1.4	1.2	0.8	0.4	0.3	1.1	0.5	1.0	0.3
Media	-0.4	2.4	0.2	0.3	0.1	0.3	1.8	16.3	0.1	2.9	0.4	68.3	0.7	4.7	47.3	1.6	3.9	21.8	16.0	2.2	4.4	2.1	3.9
Mediana	-0.6	1.5	0.2	0.3	0.0	0.0	1.1	19.2	0.1	3.9	0.6	63.9	0.8	4.6	34.5	1.5	2.9	26.4	22.1	1.9	5.7	1.8	5.0
Desvio Padrao	0.7	2.0	0.2	0.1	0.0	0.4	1.4	1.5	0.0	1.0	0.2	5.5	0.1	1.7	6.8	0.3	2.4	9.9	8.6	0.9	3.1	0.3	3.4
Coef. Variação	-156.3	81.9	95.4	28.4	71.0	156.4	80.6	9.4	41.0	35.4	56.0	8.1	14.4	35.3	14.4	16.1	61.7	45.6	53.7	42.6	69.4	14.5	88.0
Mediana/Media	1.38	0.61	0.79	0.99	0.48	0.11	0.64	1.18	0.91	1.33	1.33	0.93	1.13	0.97	0.73	0.94	0.74	1.21	1.38	0.83	1.27	0.83	1.27

Para a análise dessas premissas foi utilizada a metodologia de análise de variância (ANOVA), a qual compara a variação entre os dados para um determinado grupo amostral e a variância entre diferentes grupos a fim de identificar se esses fazem parte de uma mesma população. A Figura 6.1 apresenta um exemplo de resultado da ANOVA obtida com o auxílio do Excel

<b>Anova: fator único - Gibbsita</b>						
RESUMO						
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
Argila	2	53,8	26,90	28,88		
Silte	6	19,6	3,27	5,69		
Areia	5	39	7,80	49,01		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	843,62	2	421,81	16,65	0,00	4,10
Dentro dos grupos	253,35	10	25,34			
Total	1096,97	12				

**Figura 6.1: Exemplo de resultado da ANOVA com o uso do Excel**

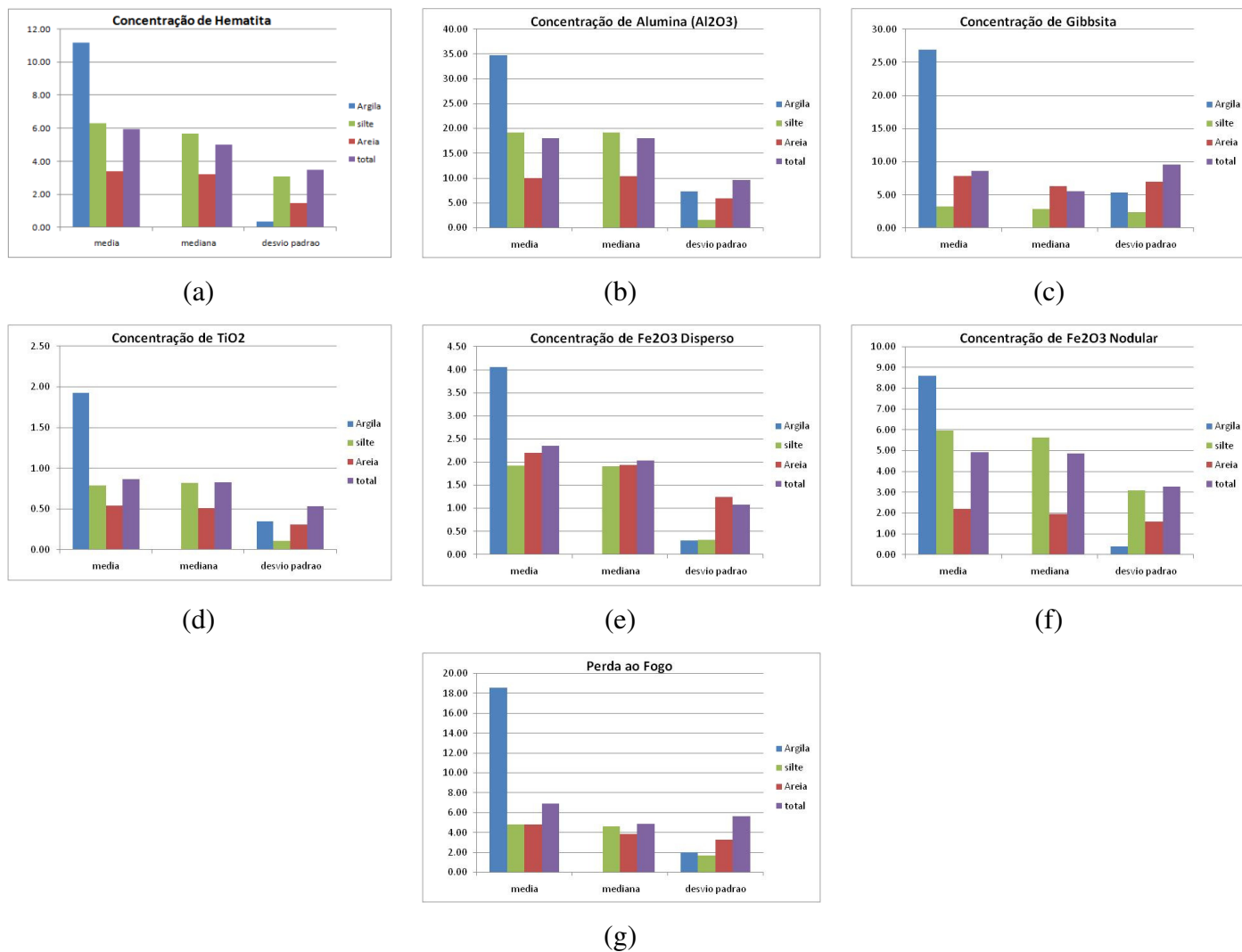
## 6.2.1 Parâmetros químico-mineralógicos e classificação dos solos

Dentre os 25 parâmetros químico-mineralógicos analisados, quatorze foram selecionados com base na metodologia ANOVA, quais sejam: concentrações de alumina, óxido de potássio, óxido de magnésio, rutilo/Anatásio, sílica, quartzo, caulinita, illita, gibbsita, óxido de ferro disperso e nodular, hematita e os parâmetros de perda ao fogo e Kr. A presença dos íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$  também foram identificados, mas dado que esses constituem os óxidos já listados, optou-se pela utilização dos componentes químicos ao invés dos íons para as análises do presente estudo.

### 6.2.1.1 Caracterização química dos solos argilosos

Solos argilosos tendem a ser os solos com maiores níveis de intemperização. Para sua caracterização foram identificados sete dentre os quatorze parâmetros selecionados pela

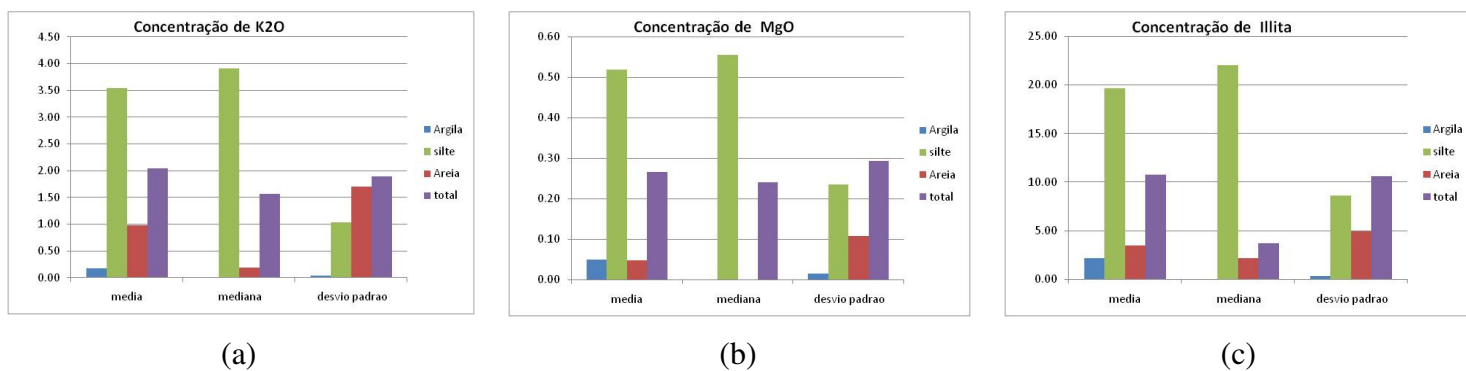
análise anterior, cujas concentrações/ocorrência se dão de forma bastante distinta nesse tipo de solo em relação aos classificados como arenosos ou siltosos que são: concentrações de hematita, gibbsita, alumina,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  disperso e nodular e rutilo/Anastásio e alta perda ao fogo. Os Figuras 6.2 (a) a 6.2 (g) apresentam as variações da média, mediana e desvio-padrão dos parâmetros selecionados para os diferentes tipos de solo.



**Figura 6.2: Parâmetros Químicos - Média, mediana e desvio-padrão para Solos Argilosos**

### 6.2.1.2 Caracterização Química dos Solos Siltosos

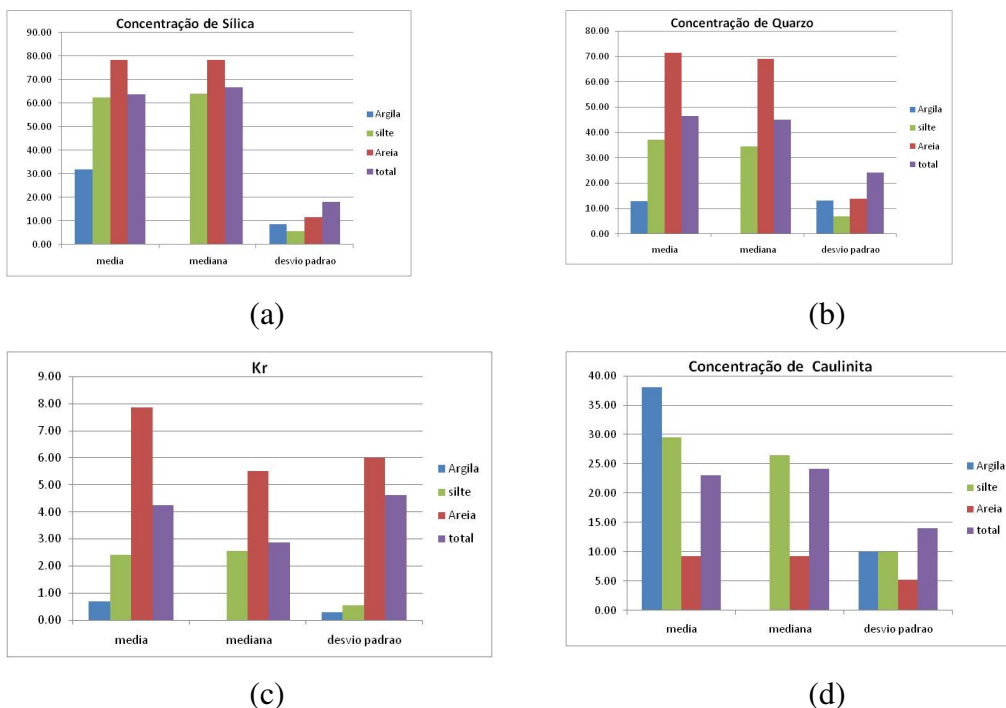
Três parâmetros foram identificados como característicos dos solos classificados como siltosos: altas concentrações de óxido de potássio, illita e óxido de magnésio, conforme apresentado nos Figuras 6.3 (a) a 6.3 (c)



**Figura 6.3: Parâmetros Químicos - Média, mediana e desvio-padrão para solos siltosos**

### 6.2.1.3 Caracterização Química dos Solos Arenosos

Os solos classificados como arenosos apresentam teores de quartzo e sílica muito superiores aos argilosos e siltosos ao mesmo tempo em que tem baixas concentrações de caulinita e altos níveis de relação entre percentuais de sílica e sesquióxidos (Kr), conforme apresentado nos Figuras 6.4 (a) a 6.4 (d).



**Figura 6.4: Parâmetros Químicos - Média, mediana e desvio-padrão para solos arenosos.**

#### 6.2.1.4 Coeficientes de correlação entre os parâmetros selecionados

A Tabela 6.5 apresenta a matriz de correlação entre os parâmetros selecionados. Os coeficientes de correlação encontrados foram, em geral, bastante elevados o que indica que a formação dos minerais avaliados pode estar relacionada a fatores em comum. Alguns pontos a serem ressaltados são:

- O Rutilo/anatásio ( $TiO_2$ ) possui altos coeficientes de correlação positivos com todos os índices químicos associados ao intemperismo dos solos e negativos com o quartzo e  $SiO_2$ , reforçando a tese defendida por pesquisadores da viabilidade do uso desse componente como indicador do grau de intemperismo dos solos.
- Outro dado a ser ressaltado, é o alto índice de correlação entre concentração de hematita e alumina (0,81), indicando que a concentração de ambas poderia estar ligada a

algum fator em comum ao longo do processo de intemperismo. Segundo a literatura, duas hipóteses poderiam ser analisadas: a rocha matriz e o pH.

- A Perda ao Fogo ocorre pela evaporação de água das hidroxilas dos argilo-mineirais e hidróxidos presentes no solo e pela perda de componentes voláteis como matéria orgânica, sulfeto, sulfato e carbonatos. Isso poderia explicar o alto coeficiente de correlação positivo com a concentração de gibbsita ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) e negativo com a concentração de  $\text{SiO}_2$ , comum em solos arenosos que, em geral, possuem baixas concentrações desses componentes.

- As concentrações de  $\text{SiO}_2$  e quartzo apresentam coeficientes negativos com todos os demais componentes. Como ambos são minerais primários altamente estáveis essa correlação é explicada pela composição mineralógica da rocha matriz. Já a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , cuja concentração tende a aumentar com o grau de intemperismo, apresenta altos coeficientes positivos com os demais componentes.

- O alto coeficiente de correlação entre os óxidos de potássio e de magnésio com a concentração de illita era esperado já que potássio e magnésio são componentes da illita.

Ressalta-se que análise minuciosa dos fatores que levam a formação dos diferentes minerais é importante para a utilização das técnicas de regressão, uma vez que essa parte do pressuposto que as variáveis independentes - utilizadas para explicar a variação de um dado parâmetro (variável dependente) - não estejam correlacionadas.



**Tabela 6.5: Coeficientes de correlação entre os parâmetros químicos identificados como mais relevantes para caracterização dos diferentes tipos de solo.**

	SIO2	AL2O3	TIO2	GIBBSITA	PF	QUARTZO	HEMATITA	CAULINITA	FE2O3NOD	KR	FE2O3DISP	ILLITA	K2O	MGO
SIO2	1,00	-0,99	-0,96	-0,74	-0,83	0,94	-0,87	-0,76	-0,80	0,79	-0,62	0,00	0,02	-0,11
AL2O3	-0,99	1,00	0,96	0,74	0,81	-0,95	0,81	0,75	0,74	-0,77	0,60	0,05	0,03	0,11
TIO2	-0,96	0,96	1,00	0,88	0,92	-0,84	0,77	0,63	0,65	-0,67	0,70	-0,15	-0,18	-0,10
GIBBSITA	-0,74	0,74	0,88	1,00	0,93	-0,52	0,56	0,27	0,40	-0,42	0,68	-0,45	-0,47	-0,44
PF	-0,83	0,81	0,92	0,93	1,00	-0,65	0,67	0,46	0,52	-0,50	0,67	-0,32	-0,41	-0,24
QUARTZO	0,94	-0,95	-0,84	-0,52	-0,65	1,00	-0,79	-0,83	-0,78	0,84	-0,47	-0,29	-0,25	-0,33
HEMATITA	-0,87	0,81	0,77	0,56	0,67	-0,79	1,00	0,87	0,96	-0,64	0,42	-0,23	-0,23	0,02
CAULINITA	-0,76	0,75	0,63	0,27	0,46	-0,83	0,87	1,00	0,87	-0,61	0,18	0,08	0,02	0,26
FE2O3NOD	-0,80	0,74	0,65	0,40	0,52	-0,78	0,96	0,87	1,00	-0,65	0,23	-0,09	-0,08	0,20
KR	0,79	-0,77	-0,67	-0,42	-0,50	0,84	-0,64	-0,61	-0,65	1,00	-0,49	-0,32	-0,34	-0,39
FE2O3DISP	-0,62	0,60	0,70	0,68	0,67	-0,47	0,42	0,18	0,23	-0,49	1,00	-0,19	-0,14	-0,15
ILLITA	0,00	0,05	-0,15	-0,45	-0,32	-0,29	-0,23	0,08	-0,09	-0,32	-0,19	1,00	0,94	0,81
K2O	0,02	0,03	-0,18	-0,47	-0,41	-0,25	-0,23	0,02	-0,08	-0,34	-0,14	0,94	1,00	0,82
MGO	-0,11	-0,10	-0,24	0,20	-0,44	-0,33	0,11	0,26	0,02	-0,39	-0,15	0,81	0,82	1,00

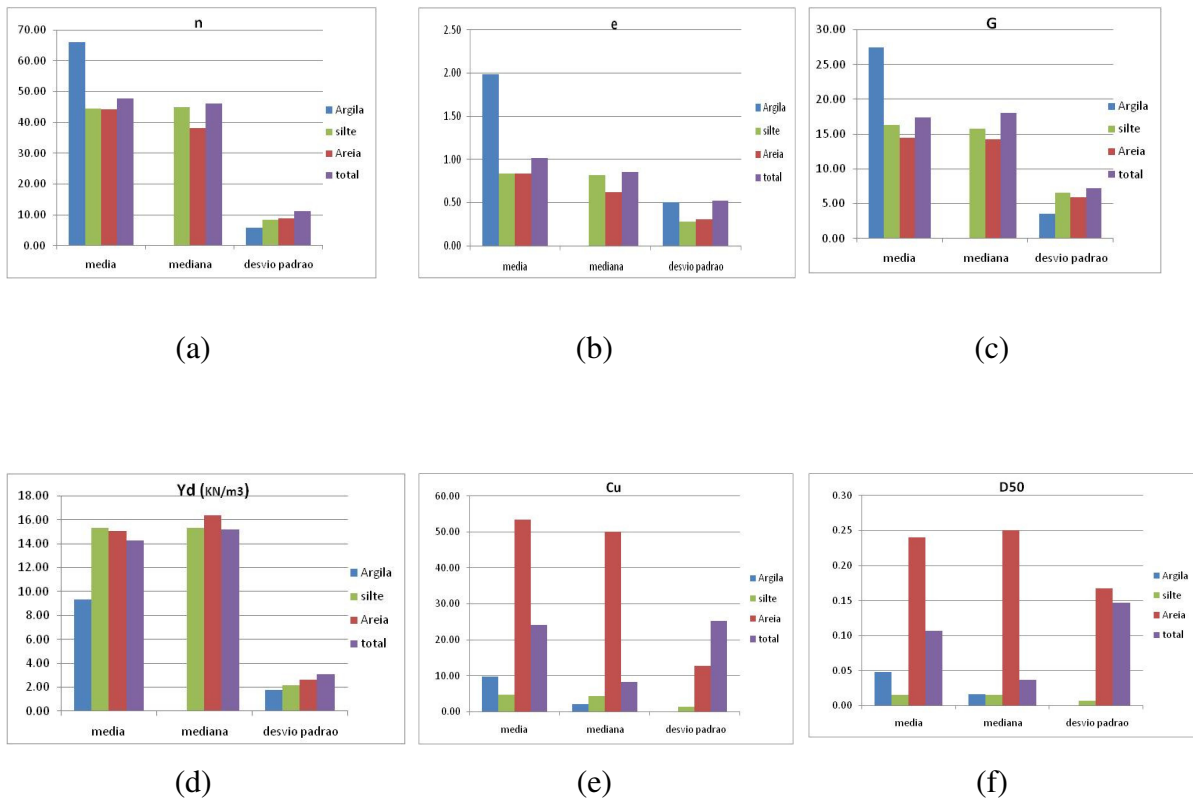
## **6.3 Análises Estatísticas – Propriedades Físicas**

São consideradas para esse estudo as seguintes propriedades físicas: umidade natural ( $w_n$ ), densidade dos grãos ( $G$ ), peso específico natural ( $\gamma_0$ ), peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), índice de vazios ( $e$ ), porosidade ( $n$ ), grau saturação ( $S_r$ ), limite de liquidez ( $w_L$ ), limite de plasticidade ( $w_P$ ), índice de plasticidade ( $IP$ ), índice de atividade de Skempton ( $I_a$ ), diâmetro correspondente a 10% das partículas (Diâmetro efetivo -  $D_{10}$ ), diâmetro correspondente a 50% das partículas ( $D_{50}$ ), coeficiente de uniformidade ( $C_u$ ), coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) e índice de floculação ( $IF$ ).

### **6.3.1 Caracterização física dos diferentes tipos de solos**

Em análise similar a realizada para avaliar a importância dos parâmetros químico-mineralógicos para caracterização dos diferentes tipos de solo – argilosos, siltosos e arenosos - serão aqui avaliadas as características físicas mais evidenciadas em cada solo.

As análises conduzidas identificaram que as variações dos parâmetros, medidas pela técnica de análise da variância (ANOVA), apresentam variações significativas para seis das dezesseis variáveis físicas analisadas: densidade dos grãos ( $G$ ), peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ), índice de vazios ( $e$ ), porosidade ( $n$ ), diâmetro correspondente a 50% das partículas sem o uso de defloculante ( $D_{50}$ ) e Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ). A Figura 6.5 apresenta a variação da média, mediana e desvio-padrão desses parâmetros para os diferentes tipos de solos.



**Figura 6.5: Parâmetros Físicos - Média, mediana e desvio-padrão**

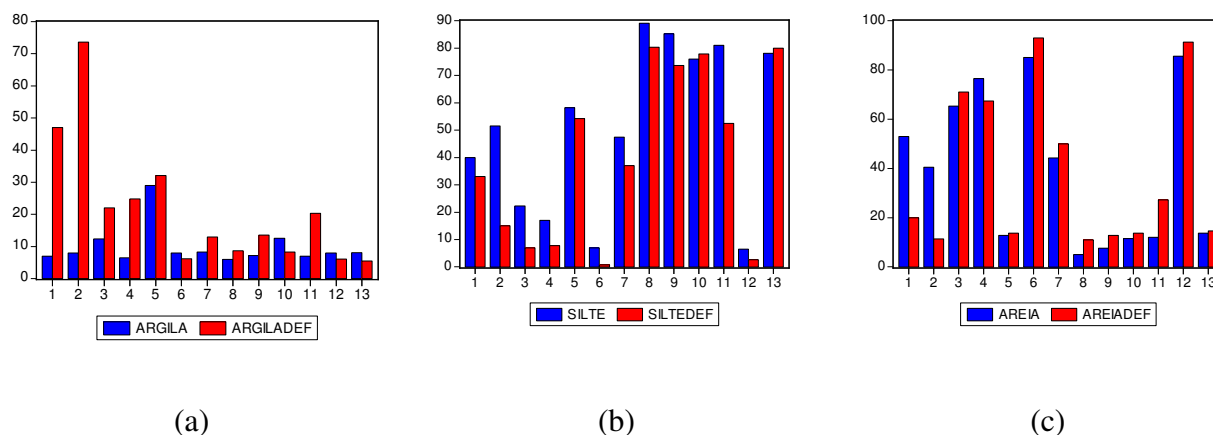
Os coeficientes uniformidade e  $D_{50}$  calculados sem o uso de defloculante, são significativamente maiores para os solos arenosos. Os valores médios para a porosidade, índice de vazios e densidade dos grãos são maiores para os solos argilosos. Os valores de  $\gamma_d$ , apesar de menos díspares, são em média menores para as argilas.

### 6.3.1.1 Análises da granulometria

Um importante atributo dos solos lateríticos é sua capacidade de agregação, fazendo com que, muitas propriedades físicas e geomecânicas tenham comportamentos distintos do que estaria associado à sua distribuição granulométrica. Vale lembrar que, segundo a literatura a agregação das partículas se dá principalmente pela formação de pontes e filmes de argila e pela cimentação realizada pelos oxi-hidroxidos de ferro e alumínio. Segundo Cardoso (2002), as propriedades físicas comportam-se, normalmente, em função da

granulometria além do que, cada um dos diferentes grupos de solos – arenosos, argilosos e siltosos - apresenta suas próprias características químicas e mineralógicas.

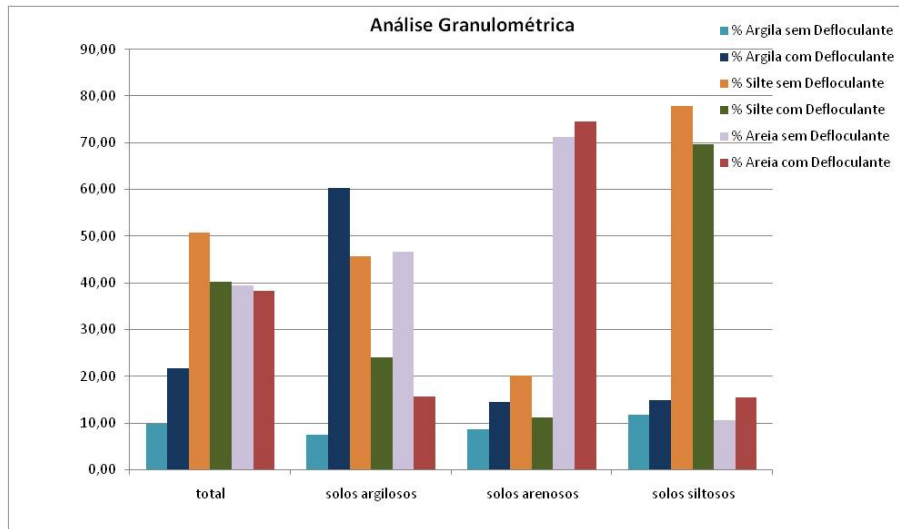
A Figura 6.6 apresenta uma comparação entre os percentuais granulométricos de silte, argila e areia medidos com e sem o uso de defloculante nas quinze amostras avaliadas.



**Figura 6.6: Comparação entre os percentuais granulométricos com e sem o uso de defloculante para as treze amostras avaliadas.**

Esperava-se que o percentual de argila aumentasse com o uso de defloculante. Contudo, segundo dados obtidos por Delgado (2007), foi verificado que esse percentual diminuiu para as amostras ZM3, SF2, SF8 e SF13, o que indicaria que o defloculante teria nesses solos atuado agregando partículas. Da mesma forma, esperava-se que o percentual de areia fosse menor com o uso de defloculante, porém, apenas nas amostras HB7, HB9 e HB11 o percentual de areia diminuiu, apesar das variações percentuais terem sido bastante pequenas. O percentual de silte diminuiu em todas as amostras.

A Figura 6.7 apresenta a variação da média dos percentuais granulométricos para cada tipo de solo, com e sem o uso de defloculante. É interessante notar que apenas nos solos classificados como argilosos houve variação significativa dos percentuais de argila com e sem o uso de defloculante. Outra observação importante é que nos solos siltosos e arenosos, ao contrário do que se poderia esperar, o percentual de areia aumentou com o uso de defloculante. A literatura indica que a illita pode influenciar a ação do defloculante, atuando na formação de agregados.



**Figura 6.7: Análise Granulométrica dos solos**

Em virtude das questões apresentadas, para o cálculo do  $D_{50}$  e Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) foram consideradas os dados granulométricos sem o uso de defloculante.

### Índice de Flocculação da Argila

Partindo do pressuposto que a agregação ocorre principalmente entre as partículas finas, tomou-se como parâmetro o Índice de Flocculação (IF) para essa avaliação, o qual considera a variação entre o percentual de partículas encontrado com e sem o uso de defloculante dividido pelo percentual total (com defloculante). Os valores de IF calculados para cada solo analisado são apresentados na Tabela 6.6.

$$IF = \frac{\% \text{ com uso de defloculante} - \% \text{ sem o uso de defloculante}}{\% \text{ com uso de defloculante}} \quad (6.1)$$

**Tabela 6.6: Valores do Índice de Floculação para as amostras analisadas.**

Amostra	IF	Amostra	IF
HB7	85,11	ZM6	31,03
HB9	89,13	SF1	47,06
HB10	43,64	SF2	-50,60
HB11	73,79	SF4	65,52
HB12	9,66	SF8	-31,15
ZM3	-29,03	SF13	-47,27
ZM5	36,15		

### 6.3.1.2 Correlações entre os parâmetros físicos

Em termos estatísticos, assim como ocorreu para os parâmetros químico-mineralógicos, os parâmetros físicos apresentam altos coeficientes de correlação entre si, conforme apresentado na Tabela 6.7.

**Tabela 6.7: Coeficientes de Correlação para os parâmetros físicos.**

	$\gamma_D$	n	e	G	D <sub>50</sub>	C <sub>U</sub>
YD	1,00	-0,99	-0,96	-0,07	0,13	0,20
N	-0,99	1,00	0,97	0,15	-0,22	-0,27
E	-0,96	0,97	1,00	0,10	-0,22	-0,27
G	-0,07	0,15	0,10	1,00	-0,75	-0,87
D <sub>50</sub>	0,13	-0,22	-0,22	-0,75	1,00	0,86
C <sub>U</sub>	0,20	-0,27	-0,27	-0,87	0,86	1,00

Pela matriz de coeficientes são identificados dois grupos de dados. O primeiro composto por  $\gamma_d$ , “e” e “n” e o segundo sendo composto por G, D50 e Cu. A principal diferença entre os grupos é que G, D50 e Cu consideram basicamente o tamanho e composição das partículas, que influenciam sua densidade. No caso de  $\gamma_d$ , “e” e “n” o arranjo inter-partículas e a formação de vazios entre as mesmas também é considerado.

### 6.3.2 Correlações entre os parâmetros químico-mineralógicos e físicos.

A Tabela 6.8 apresenta os coeficientes de correlação entre os parâmetros químico-mineralógicos e físicos selecionados como os mais importantes para a caracterização dos solos nas análises preliminares.

Nota-se que os parâmetros avaliados apresentam altos índices de correlação entre si. Foram identificados 6 grupos de parâmetros com coeficientes de correlação altos entre si além de apresentarem correlações significativas com os mesmos parâmetros indicando que estão muito correlacionados e não devem, por isso, ser utilizados como variáveis independentes em uma mesma equação. São esses:

- Grupo 1: SiO<sub>2</sub> e alumina. A sílica apresenta forte correlação negativa com a maioria dos demais parâmetros enquanto a alumina apresenta forte correlação positiva com esses componentes. A sílica representa grande parte do quartzo, material primário altamente estável, cuja concentração está diretamente relacionada à composição mineralógica da rocha matriz. Altas concentrações de sílica geralmente implicam em baixas concentrações de outros minerais mais facilmente alteráveis pelos processos de intemperismo. Já a concentração de alumina está relacionada a um alto grau de intemperismo, assim como grande parte dos demais parâmetros analisados, explicando os altos graus de correlação encontrados.
- Grupo 2: e, n,  $\gamma_d$  e óxido de titânio. A correlação entre e, n e  $\gamma_d$  é esperada já que todos consideram o volume de vazios, o qual tende a aumentar com o aumento do grau de intemperismo. A correlação dos mesmos com TiO<sub>2</sub> confirma a possibilidade do uso desse componente como um indicador do intemperismo do solo.
- Grupo 3: concentração de gibbsita e perda ao fogo (PF). A perda ao fogo ocorre em função da evaporação das hidroxilas presentes, nesse tipo de solo, principalmente na gibbsita e caulinita, sendo assim, esperado o alto índice de correlação. Contudo, esperava-se que a correlação fosse alta também com a caulinita, o que não foi verificado. Segundo Cardoso (2002), a liberação das hidroxilas da gibbsita ocorre entre 200 e 300°C e entre 400 e 600 °C para as hidroxilas da caulinita, indicando a

maior dificuldade de extração da hidroxila da caulinita. Ressalta-se ainda os altos coeficientes entre a concentração de gibbisita e PF com os índices do Grupo 2, que é explicada pela importância da gibbisita na agregação das partículas de solo.

- Grupo 4: formado por hematita,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nodular, quartzo, caulinita, Kr,  $D_{50}$  (sem defloculante), Cu e G. Esses índices, apesar de apresentarem altos coeficientes de correlação entre si, apresentam correlações fortes com diferentes parâmetros. A correlação entre a hematita e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nodular é esperada já que a hematita é o principal componente do mesmo. Ademais, como a concentração de quartzo é considerada para o cálculo do Kr, é esperado que estejam correlacionados.
- Grupo 5: Illita,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{MgO}$ . Como já dito, a correlação entre esses três componentes é esperada já que  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{MgO}$  fazem parte da composição mineralógica da illita.
- Grupo 6:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  disperso não apresentaram correlação forte com nenhum outro parâmetro.



**Tabela 6.8: Correlação entre os parâmetros químico-mineralógicos e a granulometria**

		SIO2	AL2O3	E	N	YD	TIO2	GIBBSITA	PF	HEMATITA	FE2O3NOD	CAULINITA	QUARTZO	KR	D50	CU	G	K2O	ILLITA	MGO	FE2O3DISP
1	SIO2	1.00	-0.99	-0.81	-0.77	0.70	-0.96	-0.74	-0.83	-0.87	-0.80	-0.76	0.94	0.79	0.65	0.65	-0.53	0.02	0.00	-0.11	-0.62
	AL2O3	-0.99	1.00	0.79	0.72	-0.66	0.96	0.74	0.81	0.81	0.74	0.75	-0.95	-0.77	-0.65	-0.64	0.51	0.03	0.05	0.11	0.60
2	E	-0.81	0.79	1.00	0.97	-0.96	0.85	0.85	0.91	0.78	0.63	0.62	-0.65	-0.45	-0.22	-0.27	0.10	-0.51	-0.44	-0.31	0.50
	N	-0.77	0.72	0.97	1.00	-0.99	0.77	0.78	0.85	0.78	0.67	0.61	-0.61	-0.47	-0.22	-0.27	0.15	-0.50	-0.43	-0.28	0.42
	YD	0.70	-0.66	-0.96	-0.99	1.00	-0.73	-0.77	-0.84	-0.74	-0.62	-0.57	0.54	0.39	0.13	0.20	-0.07	0.58	0.49	0.35	-0.37
3	TIO2	-0.96	0.96	0.85	0.77	-0.73	1.00	0.88	0.92	0.77	0.65	0.63	-0.84	-0.67	-0.50	-0.48	0.30	-0.18	-0.15	-0.10	0.70
	GIBBSITA	-0.74	0.74	0.85	0.78	-0.77	0.88	1.00	0.93	0.56	0.40	0.27	-0.52	-0.42	-0.12	-0.05	-0.12	-0.47	-0.45	-0.44	0.68
4	PF	-0.83	0.81	0.91	0.85	-0.84	0.92	0.93	1.00	0.67	0.52	0.46	-0.65	-0.50	-0.25	-0.28	0.09	-0.41	-0.32	-0.24	0.67
	HEMATITA	-0.87	0.81	0.78	0.78	-0.74	0.77	0.56	0.67	1.00	0.96	0.87	-0.79	-0.64	-0.49	-0.60	0.58	-0.23	-0.23	0.02	0.42
	FE2O3NOD	-0.80	0.74	0.63	0.67	-0.62	0.65	0.40	0.52	0.96	1.00	0.87	-0.78	-0.65	-0.53	-0.65	0.68	-0.08	-0.09	0.20	0.23
	CAULINITA	-0.76	0.75	0.62	0.61	-0.57	0.63	0.27	0.46	0.87	0.87	1.00	-0.83	-0.61	-0.63	-0.82	0.73	0.02	0.08	0.26	0.18
	QUARTZO	0.94	-0.95	-0.65	-0.61	0.54	-0.84	-0.52	-0.65	-0.79	-0.78	-0.83	1.00	0.84	0.80	0.83	-0.73	-0.25	-0.29	-0.33	-0.47
	KR	0.79	-0.77	-0.45	-0.47	0.39	-0.67	-0.42	-0.50	-0.64	-0.65	-0.61	0.84	1.00	0.91	0.75	-0.63	-0.34	-0.32	-0.39	-0.49
	D50	0.65	-0.65	-0.22	-0.22	0.13	-0.50	-0.12	-0.25	-0.49	-0.53	-0.63	0.80	0.91	1.00	0.86	-0.75	-0.58	-0.55	-0.59	-0.40
	CU	0.65	-0.64	-0.27	-0.27	0.20	-0.48	-0.05	-0.28	-0.60	-0.65	-0.82	0.83	0.75	0.86	1.00	-0.87	-0.45	-0.55	-0.61	-0.19
5	G	-0.53	0.51	0.10	0.15	-0.07	0.30	-0.12	0.09	0.58	0.68	0.73	-0.73	-0.63	-0.75	-0.87	1.00	0.55	0.58	0.66	0.08
	K2O	0.02	0.03	-0.51	-0.50	0.58	-0.18	-0.47	-0.41	-0.23	-0.08	0.02	-0.25	-0.34	-0.58	-0.45	0.55	1.00	0.94	0.82	-0.14
	ILLITA	0.00	0.05	-0.44	-0.43	0.49	-0.15	-0.45	-0.32	-0.23	-0.09	0.08	-0.29	-0.32	-0.55	-0.55	0.58	0.94	1.00	0.81	-0.19
6	MGO	-0.11	0.11	-0.31	-0.28	0.35	-0.10	-0.44	-0.24	0.02	0.20	0.26	-0.33	-0.39	-0.59	-0.61	0.66	0.82	0.81	1.00	-0.15
	FE2O3DISP	-0.62	0.60	0.50	0.42	-0.37	0.70	0.68	0.67	0.42	0.23	0.18	-0.47	-0.49	-0.40	-0.19	0.08	-0.14	-0.19	-0.15	1.00

### 6.3.2.1 Composição químico-mineralógica e formação de agregados

A correlação do índice de floculação (IF) com os oxí-hidróxidos de ferro e alumínio (Tabela 6.9) correspondem ao que a literatura tem apresentado, evidenciando a importância desses compostos químicos na cimentação das partículas e formação de agregados. Vale ressaltar que, com base nos dados analisados, a relação parece muito mais estreita com os oxí-hidróxidos de alumínio (alumina e principalmente gibbsita) do que com os compostos ferrosos (hematita e goethita).

**Tabela 6.9: Coeficiente de Correlação: Índice de Floculação e Mineralogia**

	HEMATITA	GOETHITA	GIBBSITA	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	IF
HEMATITA	1,00	0,23	0,56	0,81	0,66
GOETHITA	0,23	1,00	0,29	0,43	0,16
GIBBSITA	0,56	0,29	1,00	0,74	0,95
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,81	0,43	0,74	1,00	0,81
IF	0,66	0,16	0,95	0,81	1,00

### 6.3.2.2 Peso específico aparente seco ( $\gamma_d$ ) e Densidade dos grãos (G)

Ambos os índices avaliam a relação entre o peso das partículas sólidas, mas o primeiro em relação ao volume total e o segundo em relação ao volume dos sólidos. Com base na literatura são feitas as seguintes considerações: (1) com o aumento da porosidade e índice de vazios o peso específico diminui, mas, obviamente, a densidade dos grãos não é influenciada já que o volume de vazios não é considerado no cálculo; (2) tanto o  $\gamma_d$  quanto o G aumentariam com o aumento da concentração de minerais pesados como o ferro (hematita e goethita).

Essas afirmações são confirmadas estatisticamente (Tabela 6.9). De acordo com os dados apresentados, não foi identificada correlação significativa entre o índice de vazios e porosidade e a densidade dos grãos, haja vista os baixíssimos coeficientes entre “n” x G e entre “e” x G (0,1). Ao contrário, esses índices têm estreita correlação com o peso específico aparente seco (negativa).

Quanto à relação entre a concentração de ferro e os índices físicos, nota-se: (1) a goethita não apresenta correlação com nenhum dos índices, (2) o percentual de hematita está positivamente correlacionada com a densidade dos grãos e negativamente correlacionada com o peso específico.

Esperava-se que o aumento da concentração de ferro aumentasse o peso específico. Ao contrário, verificou-se que a correlação é negativa. A provável explicação para isso é que o aumento da concentração de hematita nos solos se dá concomitantemente ao aumento do índice de vazios e porosidade e surgimento de macroporos, resultantes da maior agregação das partículas, conforme demonstrado estatisticamente. Entendendo que no processo de intemperismo há tanto a lixiviação de minerais (aumentado percentual de ferro) quanto à quebra de partículas seja por intemperismo físico ou químico e formação de aglomerados (aumentando a porosidade) esse resultado é compatível com as informações encontradas na literatura.

### **6.3.2.3 Limites de Atterberg**

Os limites de Atterberg não puderam ser avaliados para nenhum dos solos classificados como solos arenosos e nem para a amostra SF13, classificada como siltosa. Assim, as correlações avaliadas para esses parâmetros são baseadas apenas nas sete amostras restantes, e por isso, foram feitas separadamente.

O limite de liquidez ( $w_L$ ) médio é de 45% para os solos argilosos e 41% para os solos siltosos. Estatisticamente, esse parâmetro não apresentou correlação significativa com nenhum dos índices avaliados. O limite de plasticidade ( $w_p$ ) médio é 36% para os solos argilosos e 24% para os siltosos, existindo assim uma diferença considerável entre os dois grupos. Estatisticamente, esse parâmetro apresenta coeficientes negativo com o quartzo,  $\text{SiO}_2$  e Kr e aumenta com o aumento da concentrações dos oxi-hidróxidos alumínio e titânio e com o coeficiente de uniformidade.

O Índice de Plasticidade tem valor médio de 9,5 para os solos argilosos e 17,5 para o siltosos. Apresenta coeficientes de correlação similares em módulo com o limite de plasticidade, mas com os sinais invertidos para todos os índices analisados, exceto para o

D<sub>50</sub>, que não possui correlação significativa com o limite de plasticidade, mas sim com o índice de plasticidade, indicando que quanto maior o D<sub>50</sub>, menor o IP.

**Tabela 6.10: Coeficiente de Correlação: Limites de Atterberg**

	WL07	WP07	IP07	IA07
SIO2	-0,564	-0,868	0,855	0,628
AL203	0,531	0,825	-0,818	-0,618
GIBBSITA	0,443	0,807	-0,881	-0,155
TIO2	0,452	0,783	-0,832	-0,720
QUARTZO	-0,502	-0,828	0,853	-0,638
KR	-0,546	-0,842	0,830	0,108
CU	0,401	0,743	-0,818	0,686
D50	0,153	0,558	-0,771	0,551
HEMATITA	0,412	0,583	-0,538	-0,445
CAULINITA	0,333	0,355	-0,242	-0,800
ILLITA	-0,269	-0,500	0,551	0,866

#### **6.4 Análises Estatísticas – Propriedades Geomecânicas**

Serão aqui apresentados os resultados referentes à caracterização geomecânica dos solos estudados por Cardoso (2002) e Delgado (2007). Os valores obtidos são sumarizados na Tabela 6.11, que apresenta os resultados para os seguintes parâmetros: umidade ótima ( $w_{ot}$ ), peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ), grau de saturação ( $S_r$ ) e perda de massa por imersão (PMI) obtidos para o solo compactado nas energias Proctor Normal e Proctor Intermediário; ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ) obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto; e índice de vazios inicial ( $e_0$ ); Pressão de entrada de ar nos macroporos (EAMA); pressão correspondente ao término de entrada de ar nos macroporos ( $B_0$ ); teor de umidade correspondente ao ponto  $B_0$  ( $w_{B_0}$ ); saturação correspondente ao ponto  $B_0$  ( $S_r B_0$ ); pressão de entrada de ar nos microporos (EAMI); teor de umidade correspondente ao ponto EAMI ( $w_{EAMI}$ ); saturação correspondente ao ponto EAMI ( $S_r EAMI$ ) obtidos pelo ensaio de determinação das curvas características.

**Tabela 6.11: Resumo dos parâmetros geomecânicos considerados**

Dados Geotécnico - Delgado (2007) e Cardoso (2002)									Cisalhamento Normal (5 Golpes)				Intermediária (8 Golpes)		
Amostra	EAMA	Bo	wBo (%)	SrBo	EAMI	wEAMI	SrEAMI	Φ	c	wot	γdmax	PMI	wot	γdmax	PMI
	(kPa)	(kPa)		(%)	(kPa)	(kPa)	(%)			(%)	(kN/m <sup>3</sup> )	(Wot)	(%)	(kN/m <sup>3</sup> )	(Wot)
HB7	20,0	55,0	17,0	59,5	3652,0	5,6	19,5	26,7	3,2	30,0	14,3	40,0	17,0	15,9	30,0
HB9	4,7	10,5	17,8	75,4	6937,0	3,8	17,9	31,3	0,0	32,0	13,3	25,0	26,0	14,9	20,0
HB10	5,2	10,9	16,4	47,9	5689,5	5,1	16,1	27,5	0,0	15,0	17,1	52,0	27,2	14,0	55,0
HB11	5,2	13,4	18,4	50,0	3211,1	10,2	25,7	30,8	2,9	17,0	17,4	63,0	14,5	19,0	57,0
HB12					3652,0	19,0	50,6	32,3	7,7	29,0	14,8	0,0	26,3	15,8	0,0
ZM3	15,5	16,5	19,0	83,1	4087,0	10,0	44,7	31,7	29,3	20,6	14,8	76,0	21,0	15,0	81,0
ZM5								33,3	3,4						
ZM6	2,0				1005,0	5,6	19,5	29,0	0,0	21,0	15,2	67,0	18,0	16,1	50,0
SF1								30,4	13,8						
SF2	4,4				3319,0	2,9	15,2	38,8	34,2	19,0	15,3	67,0	15,0	16,2	62,0
SF4					6760,0	1,3	5,4	23,2	16,6	20,5	16,4	50,0	18,4	16,9	45,0
SF8								30,0	13,4	11,0	15,9	76,0	10,5	16,5	70,0
SF13	2,0	2,0	37,6	96,5	10025,0	8,5	20,2	46,3	7,5	18,0	16,2	78,0	16,0	16,5	65,0

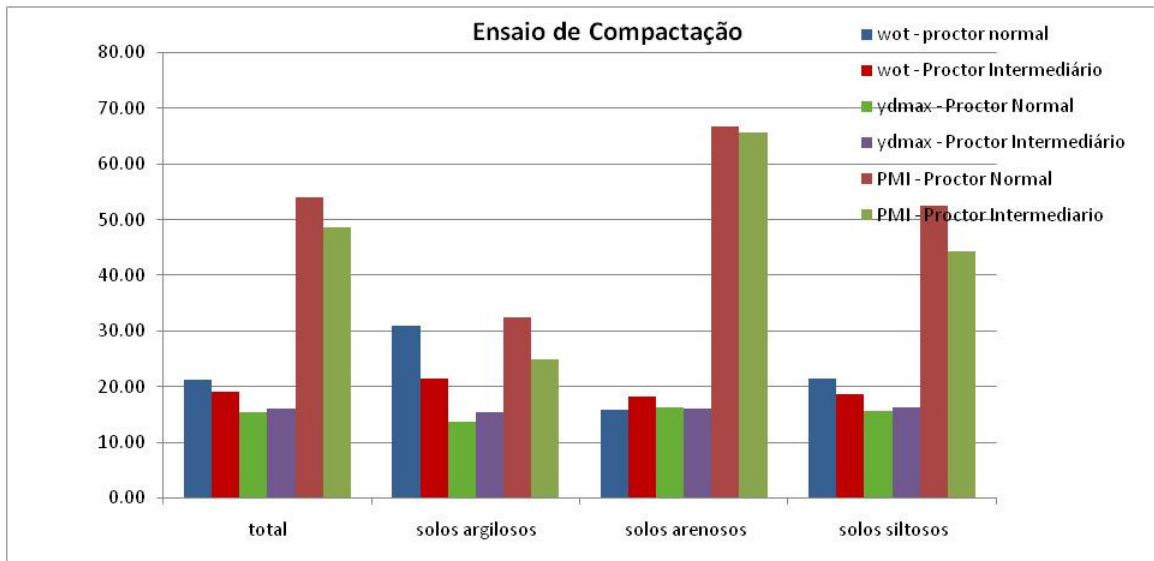
### **6.4.1 Análise de Variância – ANOVA**

De forma análoga a realizada para as análises químico-mineralógicas e físicas, foi avaliada a variância dentro e entre os diferentes grupos de solo – argiloso, silteoso e arenoso, mas diferentemente dos resultados anteriores, para os parâmetros geomecânicos não há diferenciação significativa dos dados entre os três grupos. Como já explicado, esse resultado pode ser consequência de duas situações: os parâmetros geotécnicos avaliados variam muito pouco e, independente do tipo de solo considerado, os valores médios para cada parâmetro são muito parecidos. Outra possibilidade é que os parâmetros variem tanto que mesmo dentro de um mesmo grupo de solos os resultados tenham um desvio-padrão muito alto não sendo possível diferenciar as populações.

Esse resultado reforça a dificuldade de se atribuir uma relação de causa e efeito entre os parâmetros químico, físicos e mineralógicos e as propriedades geotécnicas do solo tendo em vista a interação concomitante entre os mesmos para a determinação das propriedades geotécnicas.

### **6.4.2 Ensaio de Compactação**

A partir do ensaio de compactação foram obtidos os valores de umidade ótima ( $w_{ot}$ ), peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmax}$ ) e perda de massa por imersão (PMI) nas energias Proctor normal e intermediário para cada tipo de solo. A Figura 6.8 apresenta os valores médios de cada parâmetro considerando o total das amostras e separando-as conforme o tipo de solo.

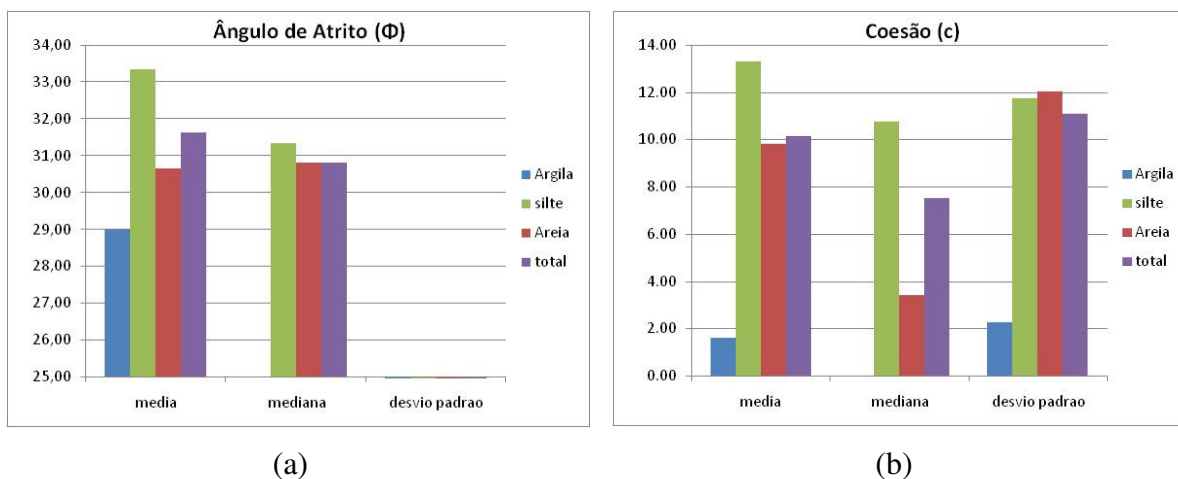


**Figura 6.8: Valores médios de Wot,  $\gamma_{dmax}$  e PMI para cada tipo de solo**

Nota-se que os solos argilosos apresentam umidades ótimas em média mais elevadas, seguidos pelos solos siltosos. Já os valores médios de  $\gamma_{dmax}$  praticamente não variam entre os tipos de solo, sendo ligeiramente menores para os solos argilosos.

### 6.4.3 Resistência ao Cisalhamento

A partir do ensaio de cisalhamento direto são obtidos o ângulo de atrito e a coesão. A Figura 6.9 apresenta a variação da média, mediana e desvio padrão para cada tipo de solo estudado.



**Figura 6.9: Valores médios de Wot,  $\gamma_{dmax}$  e PMI para cada tipo de solo**

Os valores médios obtidos para o ângulo de atrito variou pouco entre os diferentes tipos de solos (entre 29 e 33 graus). Segundo Cardoso (2002), uma dificuldade adicional para a obtenção do ângulo de atrito é a ocorrência de descontinuidades nas amostras que podem gerar planos preferenciais para cisalhamento e levar a obtenção de parâmetros que não correspondam aos esperados para determinado tipo de solo.

Dois pontos a serem ressaltados é que o ângulo de atrito é, em média, maior nos solos siltosos que nos solos arenosos, apesar destes terem partículas maiores, o que aumentaria o atrito entre as partículas e que a coesão para os solos analisados foi, em média, menor para os solos argilosos que para os arenosos. Esses resultados diferem do esperado segundo a literatura e podem indicar falhas na condução dos ensaios.

#### **6.4.4 Curvas Características**

Delgado (2007) obteve curvas características para análise dos solos estudados em diferentes condições de energia, umidade, tempo de equilíbrio e tipo de material. Entretanto, para os solos ZM5, SF1 e SF8 não foi possível a retirada de blocos indeformados, não sendo possível a realização do ensaio para o mesmo. Adicionalmente, para apenas 6 dos 13 solos considerados foi possível a determinação de EAMA e demais parâmetros característicos da entrada de ar nos macroporos.

Não foram encontrados índices de correlação significativos com nenhum dos parâmetros físicos e químicos analisados.

#### **6.4.5 Correlações**

A Tabela 6.12 apresenta os coeficientes de correlação entre as propriedades geotécnicas das amostras aqui estudadas e considerando todos os tipos de solo conjuntamente. Apenas os parâmetros de sucção não estão sendo considerados em virtude do pequeno número de resultados obtidos.



**Tabela 6.12: Coeficientes de Correlação para os parâmetros geotécnicos selecionados.**

	ATRITO	COESAO	PMII	PMIN	R2	WOTI	WOTN	YDMAXI	YDMAXNO
AL2O3	-0.101	-0.439	-0.719	-0.592	0.438	0.332	0.825	-0.115	-0.628
CAULINITA	-0.146	-0.389	-0.602	-0.443	0.306	0.292	0.633	-0.237	-0.603
CU	-0.150	0.197	0.584	0.406	-0.457	-0.048	-0.467	-0.039	0.328
D50	-0.107	0.327	0.612	0.449	-0.595	-0.129	-0.387	-0.014	0.175
E	-0.395	-0.647	-0.654	-0.610	0.439	0.517	0.713	-0.266	-0.529
FE2O3DISP	-0.175	-0.457	-0.536	-0.445	0.646	-0.031	0.468	-0.045	-0.433
FE2O3NOD	-0.112	-0.467	-0.577	-0.396	0.232	0.150	0.662	0.023	-0.529
G	0.075	-0.119	-0.515	-0.340	0.202	0.043	0.527	0.000	-0.389
GIBBSITA	-0.338	-0.493	-0.529	-0.490	0.432	0.245	0.643	0.034	-0.409
GOETHITA	0.268	-0.276	-0.601	-0.464	0.516	-0.113	0.463	0.258	-0.213
HEMATITA	-0.232	-0.554	-0.602	-0.435	0.345	0.166	0.684	-0.048	-0.591
IF2	-0.373	-0.456	-0.516	-0.469	0.406	0.267	0.678	-0.066	-0.496
IF	-0.705	-0.644	-0.544	-0.508	0.555	0.343	0.494	0.075	-0.102
ILLITA	0.403	0.297	-0.184	-0.153	0.076	0.029	0.078	0.130	0.098
KR	-0.009	0.524	0.668	0.499	-0.691	-0.132	-0.470	-0.198	0.116
MGO	0.512	0.224	-0.402	-0.359	0.017	0.118	0.230	0.047	-0.123
K2O	0.423	0.304	-0.186	-0.136	0.027	0.000	0.065	0.153	0.078
N	-0.503	-0.739	-0.688	-0.643	0.497	0.538	0.671	-0.209	-0.400
PF	-0.269	-0.490	-0.661	-0.620	0.474	0.326	0.745	-0.088	-0.512
QUARTZO	0.090	0.391	0.759	0.610	-0.470	-0.295	-0.787	0.053	0.560
SIO2	0.135	0.502	0.758	0.620	-0.484	-0.295	-0.826	0.058	0.608
TIO2	-0.199	-0.437	-0.673	-0.568	0.460	0.260	0.785	-0.070	-0.605
YD	0.521	0.735	0.646	0.617	-0.479	-0.537	-0.631	0.214	0.374

Esses resultados indicam que há uma baixa correlação entre as propriedades geotécnicas e os parâmetros químicos e físicos considerados. Isso ocorre porque as propriedades geomecânicas são resultantes de uma composição de fatores/propriedades sendo muito difícil, por meio da análise dos coeficientes de correlação, avaliar a influência de cada um dos fatores.

Como já explicado, a existência de altos coeficientes de correlação entre duas variáveis não significa necessariamente que haja uma relação de causa e efeito entre as mesmas. Os coeficientes de correlação devem ser utilizados apenas como um indicativo e análises empíricas e numéricas mais aprofundadas são necessárias a fim de se averiguar a influência de uma determinada variável sobre as demais e buscando-se, por meio de equações matemáticas, quantificar o grau de interação entre elas.

#### 6.4.6 Equações para inferência de parâmetros geotécnicos

Dentre os objetivos do presente estudo está a elaboração de equações para inferência de parâmetros geotécnicos a partir de parâmetros físicos e químico-mineralógicos, com a ajuda do programa *E-views* 6. Como já mencionado, foi considerada para a elaboração de equações a facilidade técnica de obtenção dos dados para as variáveis dependentes, a fim de evitar que a obtenção de todos os parâmetros necessários para a inferência de uma dada variável seja mais difícil do que a realização do ensaio específico para a obtenção da mesma. Alguns critérios para avaliação da adequação das equações elaboradas são:

- Facilidade para obtenção das variáveis independentes. Por esse motivo, serão aqui priorizados os parâmetros físicos como variáveis dependentes em detrimento dos químico-mineralógicos.
- As variáveis independentes não devem estar correlacionadas.
- Utilização do menor número de variáveis possível.
- Equações com maiores R quadrado ajustado.

As equações consideradas mais adequadas com base nos critérios supracitados para cada um dos parâmetros geotécnicos são apresentadas na Tabela 6.13. As equações considerando todos os solos conjuntamente não apresentaram bons ajustes reforçando a tese de que a ocorrência dos parâmetros avaliados varia muito entre as amostras, indicando que as mesmas podem pertencer a populações com diferentes valores médios.

Foram elaboradas equações para cada tipo de solo. Como, segundo a classificação proposta por Cardoso (2002), apenas dois solos foram considerados argilosos, não foi possível elaborar equações para esse tipo de solo sendo elaboradas para solos arenosos e siltosos.

Para os solos arenosos, mesmo com a utilização apenas de parâmetros físicos como variáveis dependentes, as equações apresentaram excelentes níveis de ajuste. Esse resultado está de acordo com a literatura, que confirma a predominância da influência dos índices físicos, notadamente a granulometria, na determinação das propriedades geotécnicas dos

solos arenosos, nos quais as partículas seriam praticamente inertes e com baixa interação química.

Entretanto, não foi possível a obtenção de equações com bons níveis de ajuste para o ângulo de atrito apenas com índices físicos para os solos arenosos. O bom ajuste conseguido com a consideração do índice de Perda ao Fogo (PF) indica a influência de minerais como a gibbsita e caulinita determinação desse parâmetro mesmo para os solos arenosos.

Ao contrário do que ocorreu para os solos arenosos, a maioria das equações apresentaram níveis de ajustes significativamente melhores com a consideração de índices químicos além dos físicos para o caso dos solos siltosos. Esses resultados estão de acordo com a literatura, pois se confirmou que para os solos siltosos as propriedades químicas são importantes para a determinação do comportamento geomecânico.

**Tabela 6.13: Equações para estimação de parâmetros geotécnicos**

Solos Arenosos							
	Índices Físicos	R2	R2ajust.	Erro Médio	Y Médio	Desvio-padrão Y	Durbin-Watson
Coesão	$c = 11 - 17.8 \times e + 56.5 \times D_{50}$	0.98	0.97	2.2	9.8	12	2.57
Ângulo de atrito	$\phi = 10.5 + 0.98 \times y_d + 1.4 \times IF2 + 0.05 \times Cu$	0.99	0.97	0.39	30.66	2.15	1.84
Ydmax (PN)	$Y_{dmax} = 17.8 + 0.5 \times IF2 - 0.04 \times Cu$	0.94	0.83	0.5	16.3	1.19	2.19
Wot (PN)	$W_{ot} = 0.3 \times CU + 1.2 \times IF2$	0.92	0.89	1.34	15.9	4	1.84
Solos Siltosos							
Coesão	$c = 111,46 - 63,19 \times e - 2187,87 \times D_{50} - 2,34 \times PF$	0.98	0.95	2.63	13.30	11.74	1.84
Ângulo de atrito	$\phi = 34,76 - 0,15 \times IF$	0.86	0.83	3.34	33.33	8.11	1.8
Ydmax	$Y_{dmax} = 15,37 - 1,11 \times e + 0,01 \times IF + 69,75 D_{50}$	1.00	1.00	0.02	15.54	0.68	2.2
Wot	$W_{ot} = -58,68 + 23,95 \times G + 4,08 \times e + 1,94 \times PF$	0.98	0.94	1.1	21.5	4.36	1.7

#### 6.4.7 Teste das Equações para dados da literatura

Serão aqui apresentados alguns destes das equações desenvolvidas para a previsão de parâmetros em outros solos lateríticos, utilizando-se de dados disponíveis na literatura, tais como Oliveira (2006), Guimarães (2006) e Rezende (2003).

Uma dificuldade encontrada para a realização dos testes é a obtenção de dados referentes aos parâmetros químicos, físicos e geomecânicos dos solos. Dada a dificuldade para a realização dos ensaios, os trabalhos encontrados dificilmente apresentavam dados para todas as variáveis incluídas nas equações.

A Tabela 6.14 apresenta a comparação entre os valores calculados e os obtidos experimentalmente por Guimarães (2006) para os solos de Anápolis, Goiás.

**Tabela 6.14: Dados para o solo de Anápolis-GO ( Guimarães, 2006)**

Profun.	Classif.	yd	e	G	IF	IF2	Cu	D <sub>50</sub>
1	arenoso	10.85	1.48	2.74	0.63	2.73	89.47	0.12
3	arenoso	12.06	1.28	2.8	0.52	2.06	52.94	0.04
5	arenoso	11.92	1.36	2.87	0.80	5.10	9.09	0.04
9	arenoso	14.27	0.93	2.81	0.81	5.20	13.89	1.15

Profund.	Paramet.	Medido	Calculado
1	Coesao	14	-8.6
	atrito	33	29.4
3	Coesao	15	-9.5
	atrito	37	27.9
9	Coesao	64	59.4
	atrito	31	32.5

Nota-se que os resultados calculados apresentaram uma boa aproximação na determinação do ângulo de atrito. Para o cálculo da coesão, nota-se que os resultados apresentaram valores um pouco mais baixos do que os medidos por ensaios, sendo que, para os solos que apresentavam baixos valores de coesão, o resultado calculado mostrou-se negativo. No trabalho realizado por Guimarães (2006) não se dispunha de dados de coesão e ângulo de atrito para o solo a cinco metros de profundidade.

A Tabela 6.15 apresenta a comparação entre os valores calculados e os obtidos experimentalmente por Delgado (2002) para os solos do Campo Experimental da UnB.

**Tabela 6.15: Dados para o Campo Experimental da UnB (Delgado, 2002)**

Profun.	Classif.	yd	e	G	IF	IF2	Cu	D <sub>50</sub>
1	areia	10.32	1.6	2,739	0.93	15.18	13	0.09
2	areia	10.41	1.57	2,731	0.74	3.78		0.08
3	areia	11.49	1.27	2,662	0.63	2.69	80	0.08
9	siltoso	13.8	0.96	2.77	0.73	3.67	1.2667	0.02
10	siltoso	13.29	1.08	2.816	-4.62	0.18		

Profund.	Paramet.	Medido	Calculado
1	ydmax	18.84	24.9
	wot	25	22.1
3	ydmax	15.5	15.9
	wot	27	27.2
9	ydmax	15.4	16.2
	wot	24.5	-
1	Coesao	13	-12.4
	atrito	30	42.5
3	Coesao	9	-7.1
	atrito	27	26.6

Ao se comparar os resultados obtidos pela utilização das equações propostas neste trabalho e dados experimentais obtidos por Delgado (2002) conclui-se que os resultados calculados apresentaram uma boa aproximação na determinação da densidade máxima ( $\gamma_{dmax}$ ), umidade ótima para solos arenosos e ângulo de atrito. Assim, como no caso anterior, para o cálculo da coesão, nota-se que os resultados apresentaram valores negativos uma vez que os solos que apresentavam baixos valores de coesão, apesar de bem próximos em módulo. Não foi possível estimar o valor da umidade ótima para os solos siltosos uma vez que não se dispunha do dado para perda ao fogo.

A Tabela 6.16 apresenta a comparação entre os valores calculados e os obtidos experimentalmente por Rezende (2003) para os solos do Distrito Federal.

**Tabela 6.16: Dados para os solos do Distrito Federal (Rezende, 2003)**

Solo	Classif.	$y_d$	$e$	G	IF	IF2	Cu	$D_{50}$
HBR1	siltoso	10	1.73	2.78	0.35		11.00	0.005
HBR2	siltoso	9.69	1.8	2.77	0.32		6.70	0.008

Solo	Paramet.	Medido	Calculado
HBR1	Ydmax	13.6	14.15
HBR2	Ydmax	15.2	14.253

Dados do trabalho de Rezende (2003) corroboram as conclusões anteriores quanto a adequação da equação proposta para a estimativa dos valores de  $Y_{dmax}$  também para solos siltosos.

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS

Com base nas análises realizadas no presente estudo conclui-se que:

- Com base nos dados analisados verificou-se que existem diferenças significativas entre os valores médios para vários dos parâmetros estudados, não sendo, a princípio, recomendável a consideração de todos os solos conjuntamente para a obtenção de coeficientes de correlação e regressões. Existem diversas metodologias propostas para classificação de solos. No presente trabalho, com base da técnica da análise da variância entre parâmetros, foi selecionada a divisão proposta por Cardoso (2002) em arenosos, siltosos e argilosos como a mais adequada para classificação dos solos tendo em vista os objetivos considerados.
- A análise dos coeficientes de correlação entre as propriedades químico-mineralógicas avaliadas subsidiaram as seguintes conclusões:
  - O rutilo/anatásio ( $\text{TiO}_2$ ) possui altos coeficientes de correlação positivos com todos os índices químico-mineralógicos associados ao intemperismo dos solo e negativos com o quartzo e  $\text{SiO}_2$ , reforçando a tese defendida por pesquisadores da viabilidade do uso desse componente como indicador do grau de intemperismo dos solos.
  - O alto índice de correlação entre concentração de hematita e alumina (0,81), indica que a concentração de ambos poderia estar ligada a algum fator em comum ao longo do processo de intemperismo. Segundo a literatura, duas hipóteses poderiam ser analisadas: a da influência da rocha matriz e a da influência do pH.
  - A Perda ao Fogo ocorre pela evaporação de água das hidroxilas dos argilo-minerais e hidróxidos presentes no solo e pela perda de componentes voláteis como matéria orgânica, sulfeto, sulfato e carbonatos. Isso poderia explicar o alto coeficiente de correlação positivo com a concentração de gibbsita ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) e negativo com a concentração de  $\text{SiO}_2$ , comum em

solos arenosos que, em geral, possuem baixas concentrações desses componentes.

- Uso de Defloculante: Esperava-se que o percentual de argila aumentaria com o uso de defloculante. Contudo, segundo dados obtidos por Delgado (2007), foi verificado que esse percentual diminuiu para 4 amostras das 13 analisadas, o que indicaria que o defloculante teria atuado naquelas 4 agregando partículas. Da mesma forma, esperava-se que o percentual de areia fosse menor com o uso de defloculante, porém, apenas em três amostras o percentual de areia diminuiu apesar das variações percentuais terem sido bastante pequenas. Apesar de análises com defloculante serem importantes para a análise do teor de argila em solos lateríticos, conclui-se que o uso do hexametáfosfato de sódio, defloculante tradicional referenciado pela norma brasileira, pode levar a distorções nos percentuais de silte e areia, especialmente em solos ricos em illita.
- Pela matriz de coeficientes de correlação entre os índices físicos são identificados dois grupos de dados fortemente correlacionados. O primeiro composto por  $\gamma_d$ , “e” e “n” e o segundo sendo composto por G, D50 e Cu. A principal diferença entre os grupos é que G, D50 e Cu consideram basicamente a composição, o tamanho e a distribuição das partículas, que influenciam o peso específico. No caso de  $\gamma_d$ , “e” e “n” o arranjo inter-partículas e a formação de vazios entre as mesmas também é considerado.
- A correlação do índice de flocculação (IF) com os oxí-hidróxidos de ferro e alumínio (Tabela 6.5) corresponde ao que a literatura tem apresentado, evidenciando a importâncias desses minerais na cimentação das partículas e formação de agregado. Vale ressaltar que, com base nos dados analisados, a relação parece muito mais estreita com os oxí-hidróxidos de alumínio (alumina e principalmente gibbsita) do que com os compostos ferrosos (hematita e goethita).
- A análise das equações para estimativa de parâmetros geotécnicos definidas a partir da técnica de regressão múltipla levou as seguintes conclusões:



- Para os solos arenosos, mesmo com a utilização apenas de parâmetros físicos como variáveis dependentes, as equações apresentaram excelentes níveis de ajuste. Esse resultado está de acordo com a literatura, que confirma a predominância da influência dos índices físicos, notadamente a granulometria, na determinação das propriedades geotécnicas dos solos arenosos, nos quais as partículas seriam praticamente inertes e com baixa interação química.
- Contudo, não foi possível a obtenção de equações com bons níveis de ajuste para o ângulo de atrito apenas com índices físicos para os solos arenosos. O bom ajuste conseguido com a consideração do índice de Perda ao Fogo (PF) indica a influência de minerais como a gibbsita e caulinita na determinação desse parâmetro mesmo para os solos arenosos.
- Ao contrário do que ocorreu para os solos arenosos, a maioria das equações apresentaram níveis de ajustes significativamente melhores com a consideração de índices químicos além dos físicos para os solos siltsos. Esses resultados estão de acordo com a literatura, pois, confirmou-se que para os solos siltsos as propriedades químicas são importantes para a determinação do comportamento geomecânico.
- As propriedades químico-mineralógicas estão altamente correlacionadas, o que em alguns casos indica uma relação direta entre os parâmetros, mas pode também indicar a correlação entre os parâmetros e o grau de intemperismo.

### ***7.1 Sugestões para pesquisas futuras***

De forma a continuar as análises apresentadas nesse trabalho recomenda-se para pesquisas futuras:

- Expandir o Banco de dados com resultados de ensaios tanto de campo como de laboratório para solos lateríticos provenientes de outras áreas do Distrito Federal ou mesmo em outras regiões e países, visando a realização de análises numéricas mais robustas, que possibilitem melhorar as equações para estimativa de parâmetros geotécnicos.
- Estudar o uso de outras técnicas para definição das curvas granulométricas dos solos, buscando alternativas para o hexametáfosfato de sódio principalmente no caso solos siltosos. Pesquisas nessa linha foram conduzidas por Manso (1999) que estudou o uso do granulômetro a laser e o uso de ultrassom para substituir as análises com de floculante. Em muitos solos, no entanto essa técnica não é suficiente para desagregar completamente o solo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araki, Maria Sanae. Aspectos Relativos às Propriedades dos Solos Porosos Colapsíveis do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G. DM – 040A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.

Assis, A. P.; Espósito, T. de J.; Almeida, M.G.G.; e Maia, J.A.C. (2004). Apostila de Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia. G.AP.–002/01. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 61 p.

Baptistella, Marisa. “O uso de redes neurais e regressão linear múltipla na engenharia de avaliações: determinação dos valores venais de imóveis urbanos.”  
Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área de Concentração em Programação Matemática dos setores de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

Bento, P.F. (2006). Uso de Cal e Fibras na Melhoria de Materiais para Utilização em Estruturas de Pavimentos. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G. DM – 144/06, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120 p.

Botelho da Costa, J.V. (1959) Ferralitic tropical fersiallitic and tropical semi-arid soils: definition adopted in the classification of the soils of Angola. IIIrd Inter-Africans Soils Conference. Dalaba, 1959.

Camapum de Carvalho, J. ; Gitirana JR, Gilson. “Considerações sobre parâmetros de resistência de solos tropicais”. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste, 2005, Goiânia. II Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste. Goiânia : UFG, 2005. v. 1. p. 183-191.

Camapum de Carvalho, J. ; Barbosa, A. S.; Campos, I. C. O. “Colapso total estimada a partir do ensaio oedométrico realizado na condição inundada”. In: IV Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste e de Minas-Gerais, 2009, Uberlândia. IV Simpósio Sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro-Oeste e de Minas-Gerais. Uberlândia : Universidade Federal de Uberlândia, 2009. v. 1. p. 1-10.

Cardoso, F.B.F (1995). Análise Química, Mineralógica e Micromorfológica de Solos Tropicais Colapsíveis e o Estudo da Dinâmica do Colapso. Dissertação de mestrado G.DM-026A/95. Mestrado em Geotecnia, UnB, 140p.

Cardoso, F.B.F. (2002). Propriedades e Comportamento Mecânico de Solos do Planalto Central Brasileiro. Tese de Doutorado G.TD- 009A/02. Doutorado em Geotecnia, UnB, 351p.

Delgado, A. K. C. (2007). Estudo do Comportamento Mecânico de solos tropicais característicos do Distrito Federal para uso na Pavimentação Rodoviária. Tese de

Doutorado, G.TD-045/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 392p.

Duarte, Isabel M.R., Ladeira, Fernando L. e Gomes, Celso S.F. (2002) Influência das propriedades químicas e mineralógicas no comportamento geotécnico de dois solos residuais graníticos. Dep. Geociências, Univ. Aveiro, Portugal.

Espíndula, C. R. (2000). “História da Pedologia: um Resgate Bibliográfico.” UNICAMP – Instituto de Geografia, São Paulo – SP.

Falcão, M.F.G. (1984) “Fatores Geológicos e Características de Intemperismo Condicionantes das Propriedades Mecânicas de Solos Residuais.” Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, RJ. 131p.

Formoso, M.L.L. (2006). Some topics on geochemistry of weathering: a review. An. Acad. Bras. Ciênc., Rio de Janeiro, v. 78, n. 4.

Fortes, R. M. (1999). Notas de Aula – Classificação MCT de Solos Tropicais. Escola Técnica Federal de São Paulo (CEFET-SP).

Gujarati, Damodar N. “Econometria Básica/ Damodar N. Gujarati. 3.ed. São Paulo: Pearson Makron Books, 2000. Título original: Basic Econometrics. ISBN 85-346-1111-4.

Jenny, H. (1941) – Factors of soil formation. McGraw Hill Book Co, New York, 281 páginas.

Lambe, T.W. & Whitman, R.V. (1979). Soil Mechanics, SI Version. John Wiley & Sons, New York, 553 p.

Manso, E. A., “Análise Granulométrica dos Solos de Brasília pelo Granulômetro a Laser”, 1999. 165p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Martins, E.S. (2000) Petrografia, Mineralogia e Geomorfologia de Rególitos Lateríticos do Distrito Federal. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 196p.

Massad, F. (2003). Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia. Oficina de Textos, São Paulo, 170 p.

Matos, M.A. Manual Operacional para a Regressão Linear. FEUP, 1995.

Miguel, Mirian Gonçalves; Teixeira, Raquel de Souza e Padilha, Ana Carolina. “Curvas Características de Sucção do Solo Laterítico da Região de Londrina/PR”. Publicação RCT24 – Revista de Ciência e Tecnologia, Volume 12, Nº 24 – pp. 63 a 74, Janeiro de 2006.

- Miura, K. (1973) – Weathering in plutonic rocks (Part I) – Weathering during late Pliocene of Gotsu plutonic rocks. Japan. Soc. Eng. Geol., 14.
- Nogami, J.S., Villibor, D.F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo como Solos Lateríticos. Ed. Vilibor. São Paulo, SP, 213 p.
- Oliveira, E.P. (2006). “Caracterização bio-físico-químico-mineralógica e micromorfológica de um perfil de alteração de granito- gnaisse de Curitiba, PR Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil.
- Pessoa, F.H.C. (2004). Análises dos solos de Urucu para Fins de Uso Rodoviário. Dissertação de Mestrado, Publicação nº G. DM-117A/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 151 p.
- Pindyck, R. S.; Rubinfeld, D. L. Microeconomia. 6a edição. Prentice Hall, 2005.
- Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. Maio, 1990; Volume 23: ; p. 190.
- Queiroz de Carvalho, J.B. (1987). “Análise da Microestrutura de Solos Lateríticos do Brasília. 22ª Reunião Anual de Pavimentação, Maceió, 1:313-382.
- Rahardjo, H.; Aung, K.K.; Leong, E.C. e Rezaur, R.B. (2004). Characteristics of residual soils in Singapore as formed by weathering. Engineering Geology, Vol. 73, p. 157-169.
- Rezende, L.R. (1999). Alternativas para a Construção de Bases de Pavimentos Rodoviárias. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-055A/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 169p.
- Rezende, L.R. (2003). Estudo do Comportamento de Materiais Alternativos utilizados em Estruturas de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado, Publicação G.TD 014A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 360p.
- Rodrigues, Thiago Baptista; Macrini, José Leonardo R.: e MONTEIRO, Elisabeth Costa. “Seleção de variáveis e classificação de padrões por redes neurais com auxílio ao diagnóstico de cardiopatia isquêmica.” Pesquisa Nacional, V. 28, n. 2 pg 285-302. Maio a agosto de 2008.
- Santanna, J. A. (1998). Estudo do Comportamento de Solos Artificiais em Função da Variação das Características de sua Fração Grossa. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 160 p.
- Silva, Apolino José Nogueira; De Carvalho, Fábíola Gomes. “Coesão e Resistência ao

Cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um latossolo amarelo do tabuleiro costeiro.” R. Bras. Ci. Solo, 31:853-862, 2007

Sousa Pinto, C. (2002). Curso Básico de Mecânica dos Solos. Oficina de Textos, 2ª edição, São Paulo, 355p.

Strecker, K. , De Godoy, R.C., Ribeiro Sabariz, A.L., Da Silva, D.L., Moreira, M.E.S., Castro, M.N. (2007). “Avaliação de argilas de Minas Novas – MG usadas na produção de cerâmicas artesanais.” 51 Congresso Brasileiro de Cerâmica. Junho, 2007.

Viecili, C. (2003). “Determinação dos parâmetros de resistência do solos de Ijuí a partir do ensaio de cisalhamento direto. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.

Zimback, Célia Regina Lopes (2003). “ Apostila sobre formação de solos.” Grupo de Estudos e Pesquisas Agrárias Georreferenciadas. Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu, São Paulo.